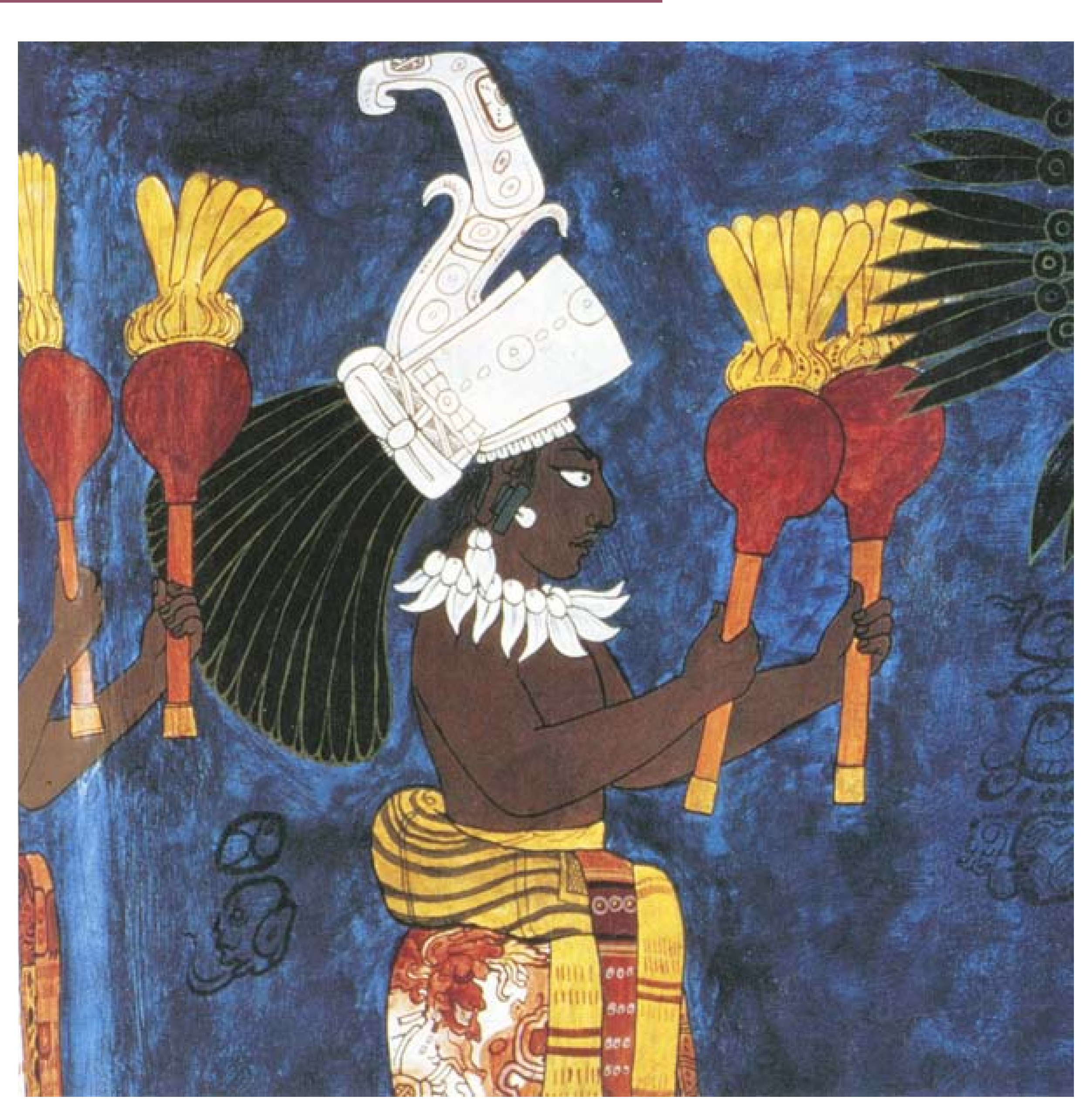
INVESTIGACION y CIENCIA

ANTICUERPOS MONOCLONALES DE SEGUNDA GENERACION

EL LENGUAJE DE LOS FRACTALES

CERAMICAS SUPERCONDUCTORAS

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN



MURALES MAYAS

OCTUBRE 1990
500 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa



Octubre de 1990 Número 169



SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Manuel Puigcerver: *Tendencias hacia el calentamiento global*; Amparo Fuertes, Nieves Casañ y Pedro Gómez: *Superconductores allende el 1-2-3*; Santiago Torres: *Infecciones asociadas con el SIDA*; Emilio Elizalde: *El lenguaje de los fractales*; Pilar Iñiguez: *Cuando el punto de fusión y de solidificación no es el mismo*; Joandomènec Ros: *Semillas dispersadas por hormigas*; José Manuel García de la Mora: *El arte maya a registro*; José Vilardell: *Taller y laboratorio*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*.

Ciencia y sociedad:

Joandoménec Ros y J. Manuel García de la Mora

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

Libros:

Ramón Pascual, F. G. Valdecasas, Rodolfo Miranda, Luis Alonso y Ramón Margalef

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
8-9	George Retseck
10-12	Patricia J. Wynne
13-15	John Deecken
18-23	Michael Goodman
24	Lynn F. Schneemeyer, AT&T Bell Laboratories
25	Johnny Johnson
27	William Travis, Instituto Nacional del Cáncer
28-29	Ian Worpole
30	Erwin Feurstein, Institutos Nacionales de la Salud (*izquierda*), Henry Masur (*derecha*)
31-32	Ian Worpole
33	Johnny Johnson
46-47	H.O. Peitgen, H. Jürgens, D. Saupe y C. Zahlten, *Fractals: An Animated discussion*, con Edward Lorenz y Benoit B. Mandelbrot (vídeo)
48	Andrew Christie
49-53	Hartmut Jürgens, Heinz-Otto Peitgen y Dietmar Saupe
54	Harmut Jürgens, Heinz-Otto Peitgen, Dietmar Saupe y Przenyslaw Prusinkiewicz
55-56	Hartmut Jürgens, Heinz-Otto Peitgen y Dietmar Saupe
59	Thomas L. Bech, Universidad de Cincinnati
60-61	Ian Worpole
62	Hai-Ping Cheng, Universidad de Chicago (*arriba*), Ian Worpole (*abajo*)
63	Ian Worpole
65	Patricia J. Wynne
66	Steven N. Handel
67-68	Patricia J. Wynne
69-70	Steven N. Handel
80	Museo y Galería de Arte de la Ciudad de Bristol
81	Norman Hammond, Universidad de Boston
82	Merle Greene Robertson
83	Mary Miller, Universidad de Yale
84	Norman Hammond, Universidad de Boston
85	Norman Hammond, Universidad de Boston (*arriba izquierda*), Justin Kerr (*arriba derecha*), Merle Green Robertson (*abajo*)
87-90	Michael Goodman
92-97	PLS, P. Horber



LA IMAGEN DE LA PORTADA, representación de un sacerdote maya, forma parte de una pintura mural de Bonampak, en México. Fue realizada a mediados de 1970, por Felipe Dávalos, para el Museo de Historia Natural de Florida en Gainsville. Las obras de Dávalos y de otros artistas puede que no tarden en ser los únicos recuerdos que queden de cómo eran los relieves y pinturas mayas, cuya policromía se halla hoy en rápido proceso de deterioro y desaparición (véase "El arte maya a registro", por J. Kinoshita, en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48 Telefax 419 47 82

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Armand Schwab, Jr., *Managing Editor*; Timothy Appenzeller, Laurie Burnham, *Associate Editors*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; John Horgan; June Kinoshita; Philip Morrison, *Book Editor*; John Rennie; Philip E. Ros; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Paul Wallich; Karen Wright
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Georg-Dieter von Holtzbrinck
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	5500	10.000
Extranjero	6200	11.500

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 500 pesetas
Extraordinario: 650 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 652 42 00

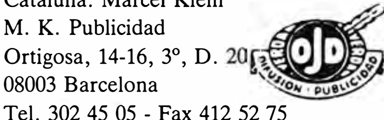
para los restantes países:

Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 409 70 45 - Fax 409 70 46

Cataluña: Marcel Klein
M. K. Publicidad
Ortigosa, 14-16, 3º, D. 20
08003 Barcelona
Tel. 302 45 05 - Fax 412 52 75



ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por T2, Llull, 145 - 08018 Barcelona
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

"Cuando el director de SCIENTIFIC AMERICAN me solicitó este artículo, me sugirió también el título: '¿Bombarderos o Acorazados?'. Casi tan sencillo y convincente sería presentar como cuestión de debate la dicotomía hermanos o hermanas, e incluso, por tomar un ejemplo más afín con lo que nos ocupa, el de 'Infantería o Tanques', siendo, como es, manifiesto que necesitamos las dos cosas. En el Ejército consideramos que la cuestión de bombarderos o acorazados constituye una polémica sin sentido."

"Desde 1850, las temperaturas terrestres crecieron lenta e irregularmente, durante varios decenios; mas, a partir de 1920, la tendencia se ha acentuado. Y a tal calentamiento parece haber acompañado, en todo el mundo, un súbito retorno hacia formas de gobierno despóticas. El hombre se ha sentido más débil. Con los fríos del último siglo se produjo un notable aumento de la población mundial y una abundancia tal de energías y genio inventivo como nunca los había presenciado la historia humana. Desde 1920, sin embargo, el aumento de población muestra señales de haber perdido fuerza y a los estadistas de varios países les preocupa la posibilidad de que realmente estemos en la curva de descenso."

"Recientemente, una ráfaga de aire cuya velocidad sextuplica la de un huracán tropical apagó un arco eléctrico de potencia suficiente para encender por un instante todas las luces de Chicago. Tan potente arco se desvaneció dejando tras de sí un tenue reguero de humo. Este nuevo cortacircuitos apaga, en un espacio de centímetros, un arco que teóricamente habría que estirar hasta unos diez o doce metros para extinguirlo."

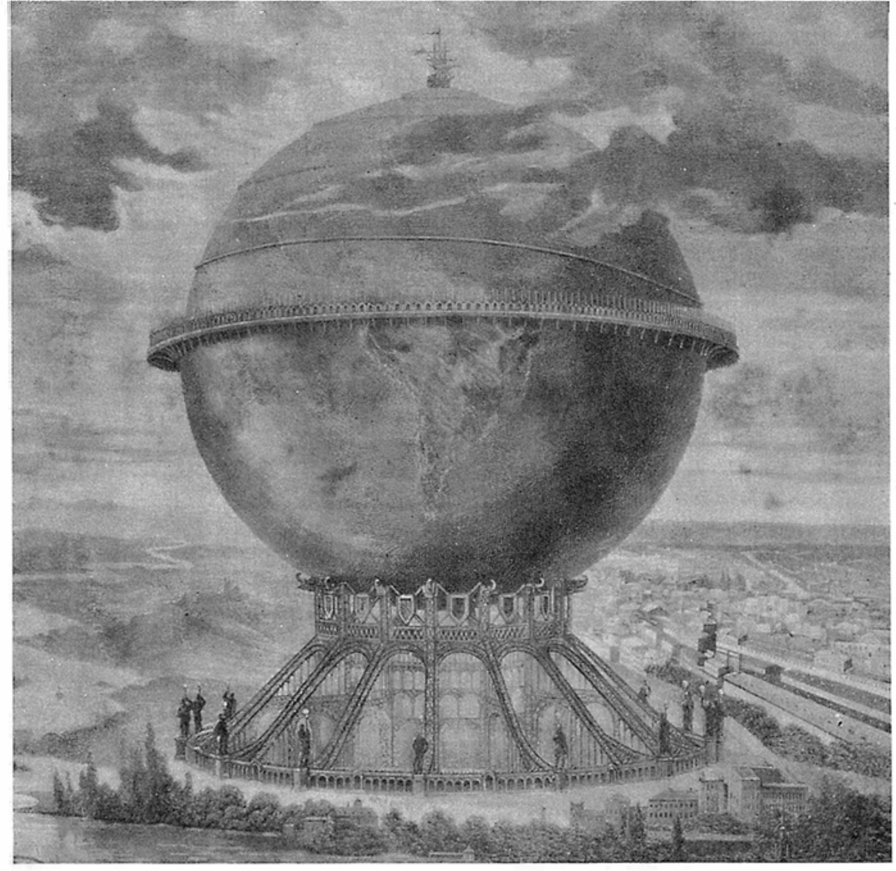
"Goodyear acaba de anunciar el último grito en caucho sintético, Chemigum, fruto de varios años de investigación. En Akron (Ohio), se está instalando una nueva planta de una capacidad inicial cercana a las cinco toneladas diarias. El Chemigum se obtiene del petróleo bruto mediante un proceso de fraccionamiento y, según se afirma, permite fabricar neumáticos de características superiores a los de Buna. Ofrece asimismo posibilidades para combinarlo con el caucho natural, por lo que en caso de emergencia podría ayudar a solventar la escasez en el abastecimiento del producto natural."

...cien años

"Veamos cuáles podrían ser las consecuencias de un encuentro celeste de la Tierra (que viaja a unos 30 km por segundo) y un cometa que tuviera pareja velocidad cuando menos. Si ese cometa fuese de núcleo sólido, la corteza terrestre se quebraría con el impacto y los torrentes de la lava que encierra la misma producirían una tremenda conmoción en su contacto con las aguas de los océanos. Además, el eje de nuestro planeta se desplazaría repentinamente. Esta es la única hipótesis plausible acerca de la inclinación de los planetas respecto a sus órbitas."

"El telescopio de 40 pulgadas que van a construir los Clark, de Cambridgeport, para la Universidad del Sur de California, tendrá un diámetro sólo un noveno mayor que el telescopio de vidrio de Lick, pero su poder colector de luz será del orden de un cuarto mayor. Este telescopio detectaría fácilmente la existencia de una ciudad extensa en la Luna. Pero en lo que atañe a los habitantes de otros planetas, esta lente de 102 centímetros nos va a dejar en la misma ignorancia que hasta ahora. Para llegar a tal cosa tendremos que esperar hasta que aparezca un genio capaz de inventar un instrumento de observación que, con relación al presente telescopio, venga a ser lo que es la luminosidad de un arco eléctrico respecto a una vela de sebo."

"Alberto de Palacio, de Bilbao (España), ha realizado un original proyecto para la Exposición Universal de 1892. Se trata de una esfera de hierro de más de 300 metros de diámetro que simboliza la terminación geográfica de la Tierra con el descubrimiento del Nuevo Mundo por Cristóbal Colón. Su interior hueco podría albergar, cual joyas en su estuche, las Grandes Pirámides de Egipto, la Esfinge y el Coloso de Rodas. Por la noche, la esfera estará iluminada por líneas de luz que seguirán los contornos de los continentes e islas, arrojando así sobre la ciudad torrentes de radiante luminosidad. Bajo la majestuosa rotonda central, se levantará una estatua del gran descubridor rodeada de los navegantes y misioneros que hicieron fructificar su descubrimiento."



Monumento a Cristóbal Colón

Tendencias hacia el calentamiento global

El análisis de registros continentales y marítimos confirma que nuestro planeta se ha calentado medio grado Celsius en los últimos cien años. A pesar de ello, las tendencias hacia el calentamiento futuro siguen siendo inciertas

Philip D. Jones y Tom M. L. Wigley

Los datos meteorológicos registrados durante los últimos cien años sugieren que el mundo se está calentando. ¿Realmente es así? Hay muchos factores, que van desde las variaciones en los modelos de termómetros hasta el crecimiento de "islas térmicas urbanas", que pueden falsear los datos y hacer aparecer una tendencia espuria al calentamiento global.

Aunque las temperaturas hayan aumentado en dicho período, ¿hay motivo para creer que continuará el calentamiento? Los modelos informáticos predicen que los gases capaces de retener calor que se han lanzado a la atmósfera durante los últimos doscientos años harán que la temperatura media mundial suba entre uno y cuatro grados Celsius en los próximos 50 a 75 años. Tales modelos, sin embargo, son simplificaciones bastante toscas de la miríada de complicados procesos que se desarrollan en la atmósfera y en los océanos; no pueden demostrar que las emisiones de gases de invernadero vayan a alterar apreciablemente el clima terrestre.

Hemos terminado hace poco un análisis de las tendencias de la temperatura global en el que se han corregido sistemáticamente los datos, tanto de las estaciones continentales como de las observaciones marítimas, para eliminar posibles fuentes de error. Este trabajo, que nos ha llevado 10 años, muestra de manera concluyente que el clima mundial, aunque resulta muy variable a lo largo de períodos de diez años e in-

PHILIP D. JONES y TOM M. L. WIGLEY son ambos climatólogos de la Universidad de Anglia Oriental en Norwich. Jones se interesa, sobre todo, por la vigilancia del clima a largo plazo y el análisis comparativo de datos climáticos y modelos generados por ordenador. Se licenció en la Universidad de Lancaster y se doctoró en la de Newcastle upon Tyne. En la actualidad es secretario de la Comisión Internacional de Climatología de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica. Wigley es director de la Unidad de Investigación Climática (CRU) de Anglia Oriental, donde modela el cambio climático pasado y futuro. Obtuvo el doctorado en la Universidad de Adelaida, se formó como meteorólogo en la Oficina Australiana de Meteorología y enseñó ingeniería en la Universidad de Waterloo en Ontario, antes de ingresar en la CRU en 1975. Su afición juvenil por la espeleología le condujo primero al estudio de la geoquímica de carbonatos y, después, a la investigación sobre el dióxido de carbono y el efecto de invernadero.

HEMISFERIO NORTE

cluso menores, se ha hecho generalmente más cálido durante los últimos cien años. La tendencia al aumento de la temperatura se interrumpió durante una breve temporada de enfriamiento, desde 1940 hasta 1970 aproximadamente; de entonces acá ha reemprendido la subida y no muestra signos de parar.

Las causas del calentamiento global son menos patentes que el propio calentamiento. Aunque el observado concuerda con el efecto de invernadero, otros factores, que van desde las erupciones volcánicas hasta las corrientes oceánicas, influyen sobre el clima y lo enmascaran. Los datos que se obtengan en los próximos diez a veinte años (durante los cuales se predice que el calentamiento se intensificará substancialmente) pueden aclarar algunas de esas ambigüedades.

Los registros históricos de temperaturas son cruciales para determinar en qué cuantía se han calentado los hemisferios Norte y Sur desde que la revolución industrial desencadenó un enorme aumento en los niveles atmosféricos de dióxido de carbono y otros gases de invernadero. Por desgracia, tales registros son difíciles de obtener. Hoy día, las mediciones globales de temperatura se obtienen por medio del Sistema Mundial de Vigilancia Meteorológica, red global cooperativa de los servicios meteorológicos nacionales. Las observaciones de los siglos precedentes se hacían sobre todo por investigadores aislados que trabajaban sin coordinación.

Hace unos diez años, a la vista de la creciente preocupación por el clima global, los autores y sus colaboradores, de la Unidad de Investigación Climática de la Universidad de Anglia Oriental, iniciaron un proyecto para recopilar y analizar, de una vez por todas, los registros históricos de temperatura disponibles. En este esfuerzo contamos con el patrocinio del Departamento de Energía de los EE.UU. y la colaboración de Raymond S. Bradley, de la Universidad de Massachusetts en Amherst, y de Henry F. Diaz, del Laboratorio de Recursos Ambientales de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA).

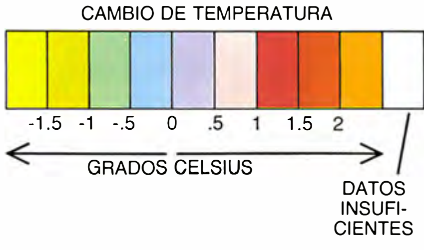
La tarea no era fácil. De los investigadores que establecieron redes de observación meteorológica sistemática en los siglos XVIII y XIX, muy pocos podrían haber previsto cuán importantes serían sus datos para ayudar a las generaciones siguientes a develar los misterios del cambio climático. No debe sorprender que los datos que nos legaron fueran escasos y, con frecuencia, incompletos y discrepantes. A pesar de ello, por la vía de cuantificar primero las incertidumbres de los datos para eliminarlas luego, hemos logrado compilar un cuadro bastante ajustado de lo que le ha sucedido al clima de la Tierra en los aproximadamente 300 años transcurridos desde que se iniciaron las observaciones meteorológicas instrumentales.

Los primeros registros resultan hoy de escasa utilidad, ya que se limitan a Europa occidental. Además, los más antiguos se han perdido en su mayoría, o han sobrevivido sólo en forma de resúmenes. Todavía se habrían perdido muchos más si no hubiera sido por los esfuerzos de Wilhelm Heinrich Dove, meteorólogo alemán que recogió cuantos datos pudo, sobre todo por correspondencia.

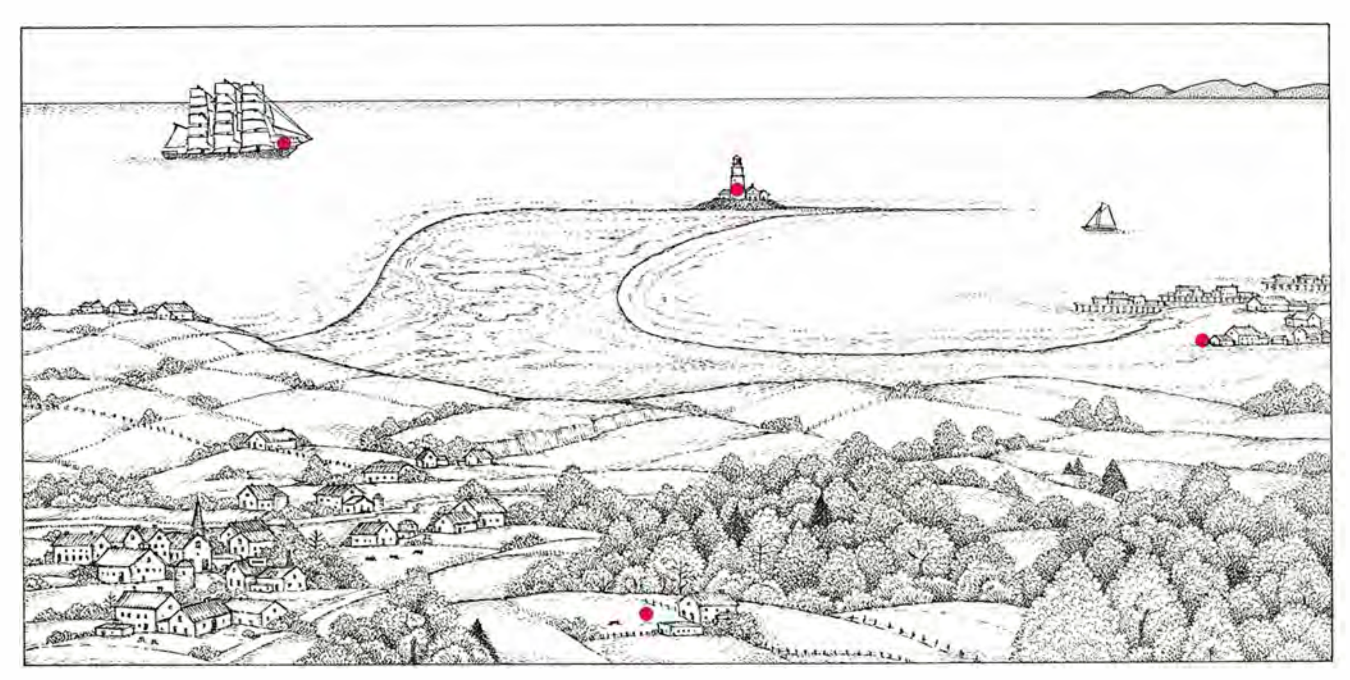
Las compilaciones de Dove son muy importantes; los primeros análisis de sus datos se adelantaron mucho a su tiempo, pero hoy ofrecen un valor limitado, al no tener en cuenta los interiores de Africa, Asia, América del Sur y Australia. Desde el año 1850, las organizaciones meteorológicas nacionales han realizado un esfuerzo concertado para recoger y archivar datos de temperatura; los registros de temperatura compilados desde entonces son, pues, mucho más completos.

Poco a poco se fueron estableciendo estaciones de observación por el resto del mundo; hacia fines del decenio de 1950, la red había llegado in-





1. TENDENCIAS AL CALENTAMIENTO y su variación de una región a otra, a tenor de los datos recopilados desde 1967 hasta 1986. Lo mismo en el hemisferio septentrional (*izquierda*) que en el austral (*derecha*), la mayoría de las regiones se han calentado, algunas notablemente, pero otras —especialmente en la parte norte de los océanos Atlántico y Pacífico— experimentaron un enfriamiento. Si las predicciones son correctas, el calentamiento global se acelerará.



2. LA TRANSFORMACION DEL PAISAJE afecta a las lecturas de temperatura hasta producir tendencias falseadas. En el siglo XIX (*izquierda*), la mayoría de las ciudades eran pequeñas y causaban, por tanto, un escaso efecto sobre el clima de las regiones circundantes. Hoy (*derecha*), las islas térmicas urbanas ejercen un impacto directo sobre el clima, elevando las temperaturas en las estaciones meteorológicas próximas. La reinstalación

cluso a la Antártida. (Hay unas cuantas pausas notables en este crecimiento: por ejemplo, la congelación del mercurio imposibilitó las primeras mediciones en las regiones septentrionales de la Unión Soviética y Canadá.)

Los intentos recientes por determinar la marcha de la temperatura global datan de hace una treintena de años. Había, al principio, una limitación seria: el escaso número de observatorios —unos centenares— cuyos datos se habían publicado. Nuestra búsqueda dio como resultado más de 3000 conjuntos de registros, muchos de ellos inéditos, que pudieron analizarse.

Una vez en posesión de una lista extensa, procedimos a reducirla. El requisito esencial era la homogeneidad: los registros de temperatura habían de reflejar sólo las variaciones de un día para otro y los cambios a largo plazo en el clima. Fluctuaciones atribuibles a otras causas (como la reinstalación en otro lugar de una estación de medida de temperatura, cálculos discordantes de temperatura media mensual, cambios de instrumentación, de horas de observación o de condiciones locales) pueden condicionar decisivamente la fiabilidad de los datos. Los efectos ambientales son la fuente de heterogeneidad más perjudicial, ya que pueden introducir un sesgo sistemático y no sólo reducir la exactitud de conjunto. El crecimiento de los pueblos y ciudades, por ejemplo, provoca islas térmicas urbanas, que suelen hacer aumentar las temperaturas medidas en las estaciones próximas.

Para comprobar la homogeneidad, comparamos los registros de cada estación con los de estaciones situadas desde algunas decenas hasta algunas centenas de kilómetros de distancia. Los saltos o tendencias de las temperaturas registradas en una estación que no se reflejan en las otras suelen ser señales de heterogeneidad. El proceso de homogeneización da buenos resultados, salvo en aquellas regiones donde la estación más cercana está a más de varios cientos de kilómetros o cuando todas las estaciones se ven afectadas por factores afines, como tasas similares de crecimiento urbano.

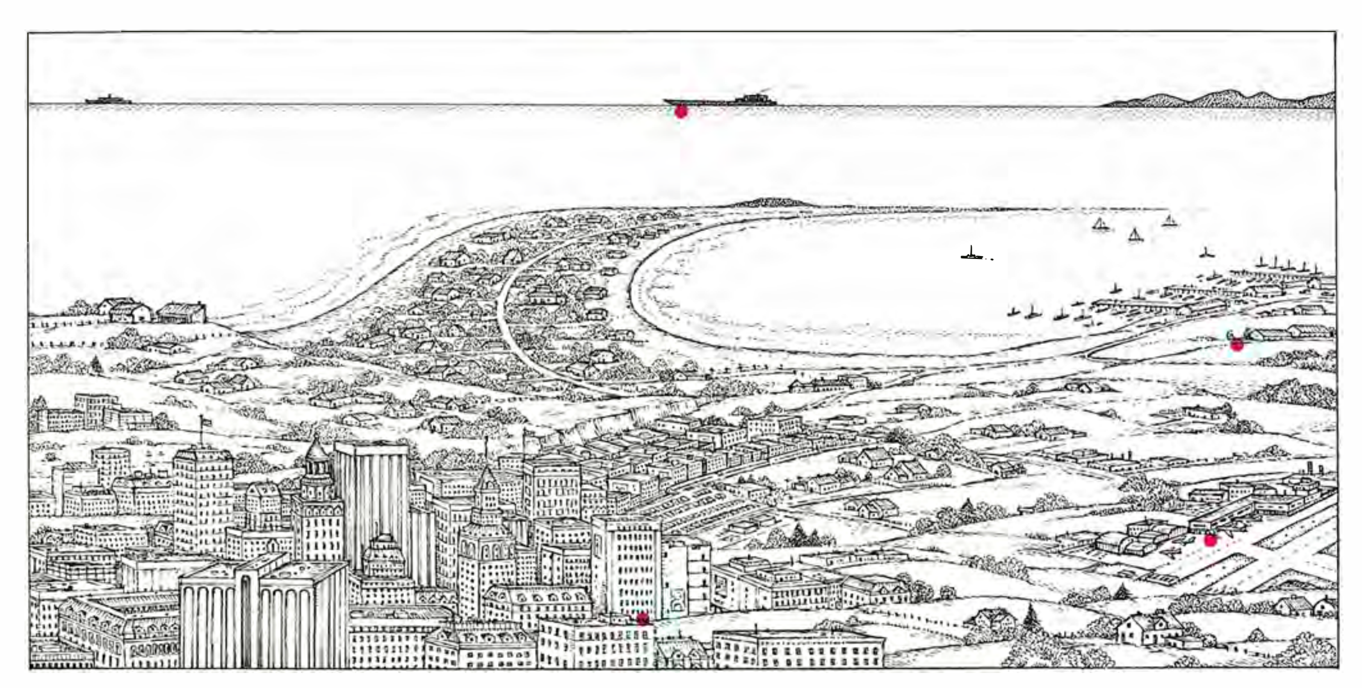
De acuerdo con esas comparaciones, aceptamos los datos de algunas estaciones, ajustamos las discontinuidades que aparecían en otras sumando o restando factores de corrección apropiados y desestimamos alrededor del 10 por ciento porque no se podían corregir de manera fidedigna. También descartamos algunas estaciones cuyos registros de temperatura acababan antes de 1950. El resultado fue una base de datos que contenía 1584 estaciones en el hemisferio Norte (de 2666 registros iniciales) y 293 en el hemisferio Sur (partiendo de 610).

Con estos datos calculamos temperaturas medias regionales y hemisféricas. La tarea no es tan sencilla como pueda parecer. Una importante fuente de error yace en el relevo de las estaciones; con el tiempo, se abren unas y se cierran otras. Si estaciones situadas en puntos más cálidos (valles) sustituyen a otras en puntos más fríos (laderas de colinas), por ejemplo, el resultado será una tendencia espuria al calentamiento.

Para eliminar tales tendencias espurias, lo más sencillo es expresar las temperaturas de todas las estaciones en términos de sus desviaciones respecto a sus temperaturas medias durante un período de referencia (1950 a 1970), del que disponemos de datos globales fidedignos. (Estimamos los promedios de las estaciones que no tenían registros en el período de referencia mediante los extraídos de las estaciones vecinas.)

Después, procesamos los datos de las estaciones para dar promedios de área, o temperaturas medias en cada punto de una rejilla de cinco grados de latitud por 10 grados de longitud (aproximadamente 550 por 1100 kilómetros en el ecuador). Algunas áreas contenían muchas estaciones, cuyos datos se promediaron para dar el valor en un punto de la rejilla; en otras, el promedio se basaba en una sola estación. A partir de esos valores obtuvimos finalmente las temperaturas medias para cada hemisferio. (Este método elimina el sesgo del promedio hemisférico hacia las regiones donde existen muchas estaciones de medición de la temperatura.)

Nuestros cálculos produjeron dos



de estaciones urbanas en aeropuertos alejados puede generar tendencias manifiestas en dirección contraria. El grado de fiabilidad de los datos oceánicos ha cambiado también con el tiempo. A medida que los buques han aumentado de tamaño, las lecturas de temperatura del aire se han ido tomando a distancias cada vez mayores de la superficie del océano (donde el aire es más cálido), creando así una falsa tendencia al enfriamiento.

resultados inmediatos: primero, estaba claro que el clima global varía considerablemente de un año a otro; y segundo, se confirmaba que la Tierra ha experimentado una tendencia al calentamiento global de medio grado desde fines del siglo XIX.

Pese a todos nuestros esfuerzos por asegurar que los registros que analizamos fueran homogéneos, subsiste cierto número de preguntas en torno a su grado de fiabilidad. ¿Son los promedios anteriores, compilados a partir de un conjunto de estaciones mucho menor, comparables con los de tiempos más recientes? ¿Podemos estar seguros de haber eliminado el sesgo asociado al calentamiento urbano? Y, por último, ¿hasta qué punto las temperaturas de estaciones situadas en tierra firme representan el clima de un planeta cubierto en sus dos tercios por agua?

Para determinar si la escasa densidad de los registros antiguos mermaba la fiabilidad de los promedios del siglo XIX, compilamos promedios revisados para un subconjunto de estaciones meteorológicas. Estos promedios imitaban la menor densidad de estaciones típica del siglo XIX. El valor de las discrepancias entre los promedios del subconjunto y las verdaderas cifras implicaba que las estimas de temperatura para los años anteriores a 1880 poseían una exactitud que es sólo la mitad de las obtenidas a partir de 1920. Los mismos datos muestran, por el contrario, que las estimas de temperaturas medias en el curso de un decenio – que revisten mayor importancia a la hora de establecer la tendencia a largo plazo– son muy fidedignas. Hay datos suficientes para fijar el promedio de un decenio con un error de 0,1 grado Celsius desde el decenio de 1850 en adelante en el hemisferio Norte y desde el de 1880 en el austral.

Para someter a criba nuestros métodos de eliminación del sesgo debido al efecto de isla térmica urbana, comprobamos luego nuestros promedios anuales para la totalidad de los EE.UU. con los calculados por Thomas R. Karl, del Centro Nacional de Datos Climáticos de Asheville, Carolina del Norte, quien usó datos procedentes sobre todo de zonas rurales. Los nuestros muestran sólo alrededor de una décima de grado Celsius de calentamiento más que los de Karl; resulta claro, pues, que nuestro filtrado se ha dejado sentir en la eliminación del sesgo urbano.

Aunque la décima de grado Celsius restante podría representar un ligero sesgo instado por dicho efecto, podría también estar ligada a otros factores. La comparación de nuestros datos con registros rurales de la Unión Soviética, China oriental y Australia oriental muestra sólo un exceso de calentamiento de entre cero y 0,05 grados Celsius por siglo, lo que indica que otros factores distintos del sesgo urbano podrían ser la causa de al menos parte de las diferencias entre los promedios de Karl y los nuestros.

Las medidas de temperatura a las que nos hemos venido refiriendo se tomaron todas en tierra firme, que cubre sólo un tercio aproximadamente de la superficie terrestre. Pero hay razones para creer que los datos de tierra firme ofrecen una buena estima de las fluctuaciones de la temperatura hemisférica, al menos durante períodos de decenios y siglos. Las capas superiores de los océanos tienen una capacidad calorífica mucho mayor que la de la atmósfera o la de la delgada capa de corteza terrestre que participa en los cambios de temperatura en el curso de un siglo o menos; podría esperarse por ello que las variaciones de temperatura en tierra firme reflejaran, con notable aproximación, las variaciones de temperatura sobre los océanos. Dado que los vientos que soplan entre ambos aseguran un buen intercambio térmico entre esas dos partes del globo, cualquier diferencia debería desaparecer prestamente.

De hecho, el señalado paralelismo entre las temperaturas continentales y marítimas ofrece la oportunidad de comprobar y reforzar la confianza que pongamos en las estimas del calentamiento basadas sólo en registros procedentes de tierra firme. En relación con esto, el mundo climatológico está en deuda con un capitán de navío de la Armada de los EE.UU., Matthew Fontaine Maury. Los esfuerzos pioneros que realizó en los decenios de 1830 y 1840 ayudaron a formular las normas seguidas por los buques en sus observaciones meteorológicas en

el mar, y en las que se incluye la medición de la temperatura del aire y del agua. Resultado en buena parte de su trabajo, se firmó en Bruselas, en 1853, un acuerdo internacional para tomar, difundir e intercambiar observaciones meteorológicas marítimas.

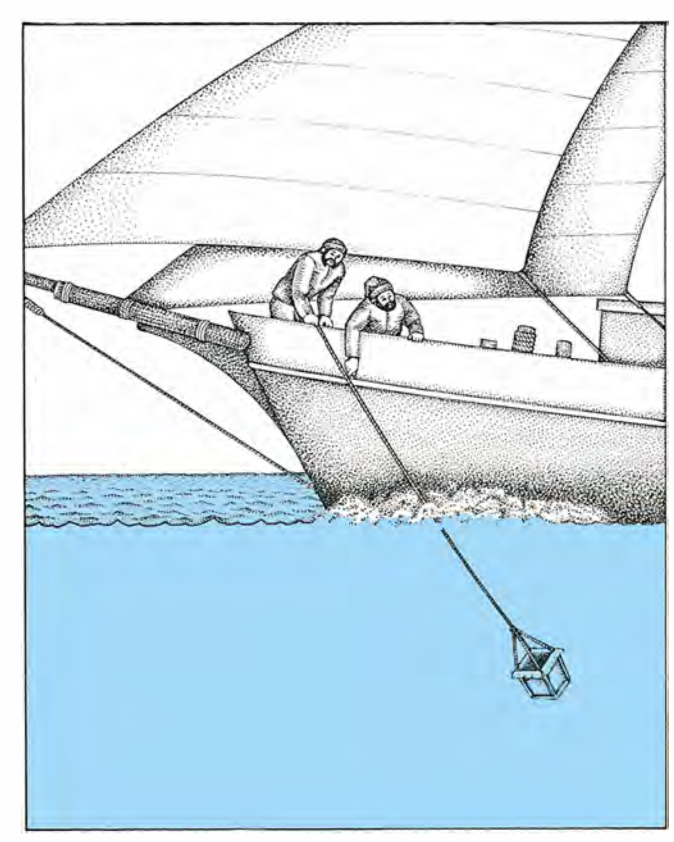
Desde entonces, las diversas naciones marítimas —los EE.UU., Gran Bretaña, Francia y otras— han archivado los cuadernos de bitácora que contienen observaciones meteorológicas sobre el mar. Durante los últimos 20 años, la información de esos cuadernos (que supone unos 80 millones de observaciones, sólo por lo que se refiere a la temperatura del agua del mar) se ha transferido a dos bancos informáticos, el Conjunto Completo de Datos Océano-Atmósfera, compilado por la NOAA y otros organismos de los EE.UU., y una compilación separada realizada por la Oficina Meteorológica Británica.

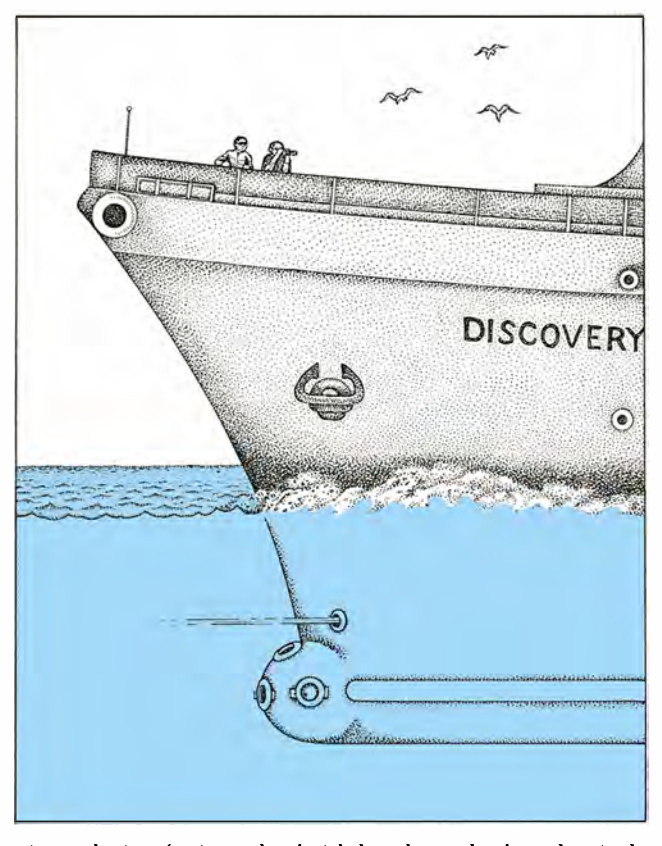
Al igual que los continentales, los registros marinos deben ajustarse para tener en cuenta los cambios de las técnicas de medida y otros efectos. Antes del decenio de 1940, las temperaturas de la superficie del mar se tomaban lanzando un balde por la borda, izándolo a cubierta con agua del mar y esperando unos minutos para que el termómetro se atemperara antes de leer y anotar la temperatura del agua. Sin embargo, desde 1940, la mayoría de las mediciones de temperatura de la superficie del agua se toman en los conductos de entrada de agua del mar para la refrigeración de las máquinas del buque. Aunque hoy en día aún se hacen muchas medidas con el balde y antes de 1940 se hacían ya algunas en las conducciones de entrada, el cambio de técnica fue bastante brusco.

Los estudios comparativos nos dicen que las medidas en los conductos de entrada superan, en 0,3 a 0,7 grados Celsius, las tomadas con balde de lona sin aislar; el incremento es del orden del calentamiento observado en los registros. Es, pues, obligado corregir esta heterogeneidad. Ahora bien, los cuadernos de bitácora no comenzaron a especificar si las medidas se tomaban con balde o en el conducto de entrada hasta los años setenta; por eso las correcciones resultan algo problemáticas.

Agréguese que no todas las medidas con balde son iguales. Los baldes mojados se enfrían por evaporación al izarlos hasta cubierta. La cuantía precisa del enfriamiento depende de las condiciones meteorológicas y de las cualidades aislantes del balde. En un intento de normalización de las lecturas de temperatura, el convenio de Bruselas de 1853 especificaba el uso de baldes de madera, cuyas cualidades aislantes son buenas, pero las flotas del siglo XIX continuaron usando baldes de lona, zinc y otros materiales. Durante el período de 1900 a 1940, la mayoría de los buques llevaban baldes de lona, que son malos aislantes y permiten que el agua del mar se enfríe apreciablemente en el intervalo entre la toma de la muestra y la medida. Los baldes usados desde la segunda guerra mundial son de plástico y adecuadamente aislados; sus lecturas concuerdan con las medidas en los conductos de entrada.

Las mediciones de la temperatura del aire sobre el mar han de vencer también, cabía esperarlo, los problemas de homogeneidad. El más crítico es el causado por el aumento del tamaño medio de los barcos a lo largo del tiempo, con el incremento correspondiente de la altura de la cubierta (y, por tanto, del termómetro) sobre el nivel del mar. La temperatura del aire suele decrecer apreciablemente con la altura; tal aumento de altura produciría una falsa tendencia al enfriamiento. Además, es casi imposible saber si los termómetros de un buque estaban directamente sometidos



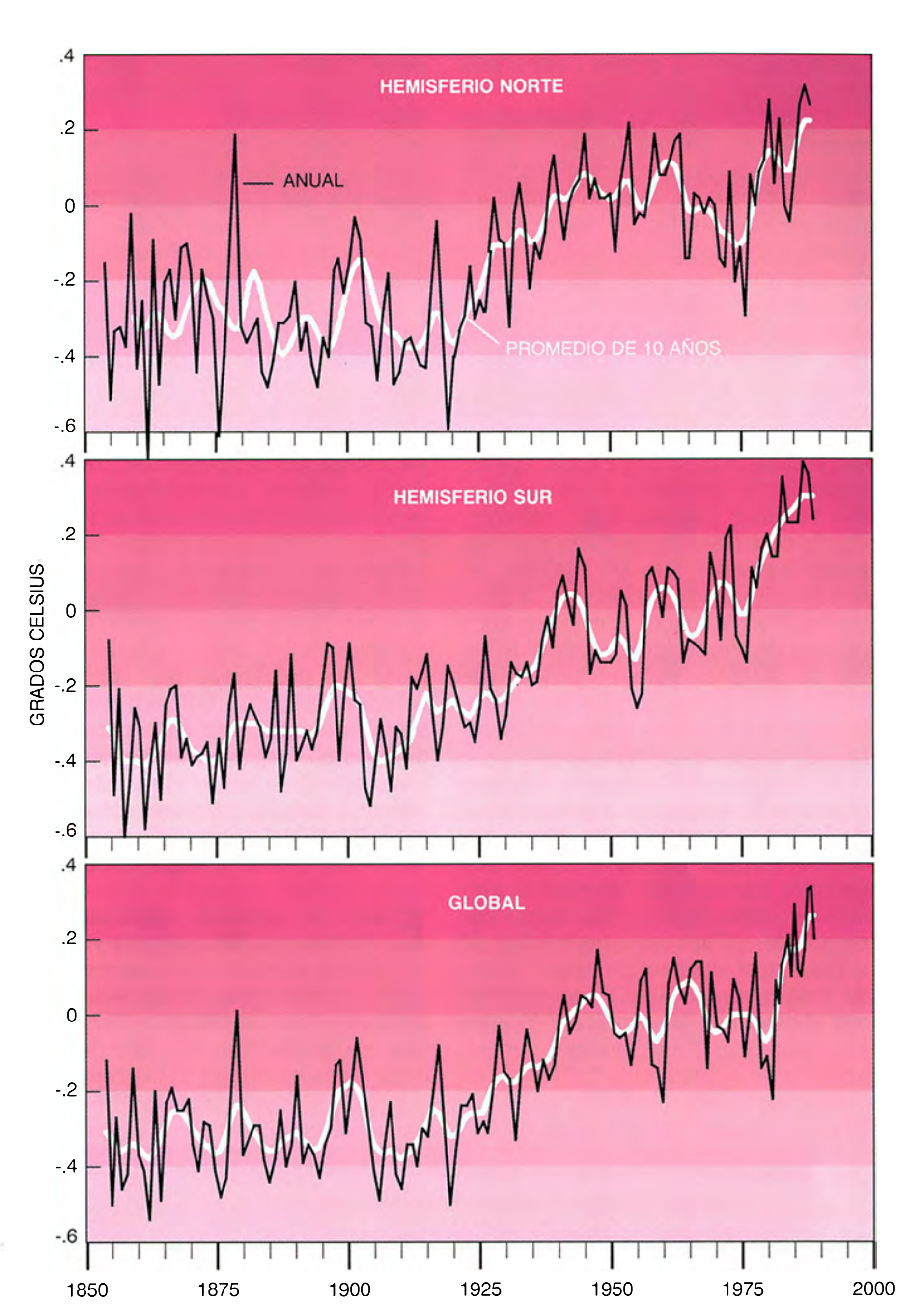


3. LAS TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE DEL MAR deben corregirse ateniéndonos a la técnica de medición. Antes del 1940, las lecturas se tomaban izando agua a la cubierta en un balde (*izquierda*). Desde entonces, los termómetros se han instalado en las conducciones de entrada de agua para refrigeración de las máquinas. Como el agua se enfría por evaporación, las lecturas del balde pueden ser inferiores en hasta 0,7 °C.

a los rayos solares o colocados cerca de estructuras calientes, causas ambas que producirían lecturas anormalmente altas.

Los registros obtenidos durante la segunda guerra mundial proporcionan ejemplos clásicos de causas diversas de heterogeneidad. En ese lapso, la mayoría de los termómetros se trasladaron a los puentes, donde se podían tomar las lecturas con mayor seguridad (pero donde las estructuras calientes provocaban, a su vez, la subida de la temperatura del aire). Además, la mayoría de los registros se realizaba durante el día, prohibido como estaba encender de noche la luz para leer el termómetro. A ello se debe que las temperaturas tomadas durante la guerra sean, sistemáticamente, un grado más altas que en los años precedentes o subsiguientes.

Al principio de nuestro análisis, corregíamos los datos marinos comparando los tomados cerca de las costas con observaciones hechas en tierra firme (islas y playas). Atribuimos las diferencias entre temperaturas continentales y marítimas a las heterogeneidades de las mediciones marítimas, y dedujimos factores de corrección promediando esas discrepancias para muchas regiones. Este enfoque presupone la homogeneidad de los datos continentales, lo que no impide que las correcciones suministradas sean muy coherentes. La técnica de promediado que requiere, sin embargo, limita su uso a datos medios anuales hemisféricos; no sirve para promedios locales o escalas de tiempo mensuales.



4. LA VARIABILIDAD CLIMATICA aparece en forma evidente en los registros históricos de temperaturas anuales y medias de 10 años sobre las zonas terrestres y oceánicas del hemisferio septentrional (*arriba*), austral (*centro*) y de todo el mundo (*abajo*). En los tres gráficos, sin embargo, se nota una tendencia ascendente de la temperatura; incluso los años más fríos del último decenio son más cálidos que todos los precedentes, si exceptuamos los años más cálidos de un siglo atrás.

Hemos adoptado una técnica de corrección mejor, desarrollada por Chris K. Folland y David E. Parker, de la Oficina Meteorológica Británica, que afina las mediciones más antiguas teniendo en cuenta el enfriamiento por evaporación de los baldes. La cuantía del enfriamiento depende de dos factores: las condiciones meteorológicas y el tiempo de exposición desde que se iza el balde sobre cubierta hasta que se mide la temperatura del agua. Mientras que las condiciones meteorológicas dependen de la época del año y del lugar donde se realiza la medida, la exposición, desconocida por lo común, debe estimarse a través de los propios datos. Para ello, expresamos la temperatura de la superficie del mar en un mes dado en términos de su diferencia con respecto al promedio de ese mes en el período de referencia 1950-1979. Como los ciclos estacionales de temperatura oceánica han permanecido relativamente estables durante los últimos 100 años, las desviaciones no deberían mostrar variación discernible invierno-verano: por ejemplo, la diferencia entre la temperatura de diciembre de 1890 y el promedio para diciembre en el período de referencia no debería ser más alta ni más baja que la diferencia entre las temperaturas de junio de 1890 y el promedio de junio para el período de referencia. Cualquier pauta estacional que aparezca en los datos ha de atribuirse a los baldes, que se enfrían en cuantía dependiente de la época del año. Por consiguiente, y a tenor de la diferencia estacional que aparezca, podemos estimar un tiempo de exposición y corregir de acuerdo con él todos los datos de baldes.

Las correcciones deducidas de los datos de tierra firme y de los modelos de enfriamiento concuerdan muy bien durante el período de 1900 a 1940, en que casi todos los buques usaban baldes de lona. La concordancia es también buena para el siglo XIX, si se supone que la mayoría de las muestras se tomaron con baldes de madera. Pero si aceptamos que se usaron baldes de lona, los promedios hemisféricos de los datos marítimos son sis-

temáticamente 0,2 grados Celsius más altos que los continentales.

A pesar de todo, las comparaciones generales de ambos tipos de datos muestran un notable paralelismo. Incluso a escala de tiempo anual, los promedios hemisféricos sobre continentes y océanos están notoriamente correlacionados; para fluctuaciones de período más largo, concuerdan casi por completo. Las incertidumbres remanentes deben atribuirse a insuficiente cobertura global. En algunas regiones, sobre todo en los océanos meridionales, las medidas son escasas incluso hoy en día. Los resultados de recientes exploraciones con satélites sugieren, sin embargo, que la cobertura incompleta no es un problema grave. Roy W. Spencer, de la NOAA, y John R. Christy, de la Universidad de Alabama, han presentado estimas de temperatura a partir de datos de satélites para el período de 1979 a 1988 que se ajustan muy estrechamente a nuestras series continentales y marítimas combinadas.

Tras nuestros diez años de localizar registros de temperatura y depurarlos de fuentes potenciales de error, podemos afirmar que las temperaturas globales han subido durante los últimos cien años. Pero subsisten muchas preguntas: ¿Cuál es la intensidad de la tendencia al calentamiento? ¿Dónde reside su causa? ¿Tiene que ver con el efecto de invernadero? Y, si es así, ¿por qué se interrumpió con un período de enfriamiento? ¿Hasta qué punto resulta significativo que 1987 y 1988 fueran los dos años más cálidos nunca registrados?

La respuesta definitiva a la mayoría de esas preguntas sólo se obtendrá recogiendo datos adicionales durante decenios. Pero, aun sin tales datos, los actuales modelos climáticos pueden arrojar alguna luz. El cambio climático está determinado por factores internos y externos; citemos, entre los primeros, las variaciones del albedo planetario (resultantes de las variaciones naturales de cobertura nubosa o características de la superficie) y de los modos de la circulación atmosférica u oceánica. Los modos de circulación atmosférica determinan los flujos horizontales y verticales de calor a través de la atmósfera; por ello, influyen sobre la manera en que el calor se toma de las masas continentales y oceánicas o se cede a ellas. Por su parte, las configuraciones de la circulación oceánica influyen bastante sobre la temperatura en la parte baja de la atmósfera y sobre las tasas de intercambio de calor entre ésta y los océanos. Las fluctuaciones de ambos modos pueden originar fluctuaciones de la temperatura a largo plazo.

Entre los factores externos que afectan al clima los hay naturales, así los cambios de la luminosidad solar, y otros que pueden ser tanto naturales como artificiales. Los cambios en la fracción de radiación de onda corta que llega a la troposfera (la porción de la atmósfera donde se producen los fenómenos del tiempo) pueden ser el resultado de un incremento de las emisiones industriales o de la inyección natural de polvo y sulfatos en la estratosfera por erupciones volcánicas, o de ambas cosas a la vez. Las emisiones industriales también intervienen indirectamente en el clima alterando el albedo de las nubes. Por lo demás, las crecientes concentraciones de gases de invernadero pueden afectarlo al modificar la absorción de la radiación saliente de onda larga por la troposfera.

La mayoría de las variaciones climáticas interanuales provienen de factores internos relacionados con la circulación atmosférica. A escalas de tiempo más largas —entre dos y ocho años—, se deben a variaciones en la circulación vertical de los océanos y en las temperaturas de la superficie del mar. Por ejemplo, los fenómenos de El Niño/Oscilación del Sur (un colapso de la situación dominante de vientos del Este en superficie, vientos del Oeste a grandes alturas y afloramiento de agua fría en el Pacífico oriental) conducen a un aumento mundial del número de borrascas y a un descenso transitorio de la temperatura media mundial. De hecho, la tendencia al calentamiento de fines del decenio de 1980 se aprecia con mayor claridad cuando se corrige el efecto de El Niño; 1989 se convierte en el año más cálido registrado; 1988 y 1987 son, respectivamente, el segundo y el tercero.

Puede esperarse también que se produzca una notable variación climática en escalas de tiempo de decenios, o más largas, en virtud de la gran inercia térmica de los océanos, que interactúa con las fluctuaciones de período corto y acentúa las de escalas de tiempo mayores. Para calcular el efecto de la inercia térmica se impone, a un modelo climático apropiado, un ruido aleatorio que simule las variaciones de alta frecuencia (de un año a otro) observadas en la temperatura media global.

Resulta así que, a lo largo de cien años, las variaciones de baja frecuencia pueden llegar a 0,2 o 0,3 grados Celsius. En otras palabras, tal vez el 50 por ciento de la tendencia al calentamiento observada en este siglo puede atribuirse a fluctuaciones naturales internas. Sin embargo, una interpretación igualmente plausible de los datos podría ser la de que un calentamiento mucho mayor, quizá de 0,7 a 0,8 grados Celsius, se ha compensado, en parte, con una fluctuación interna de enfriamiento generada de forma natural.

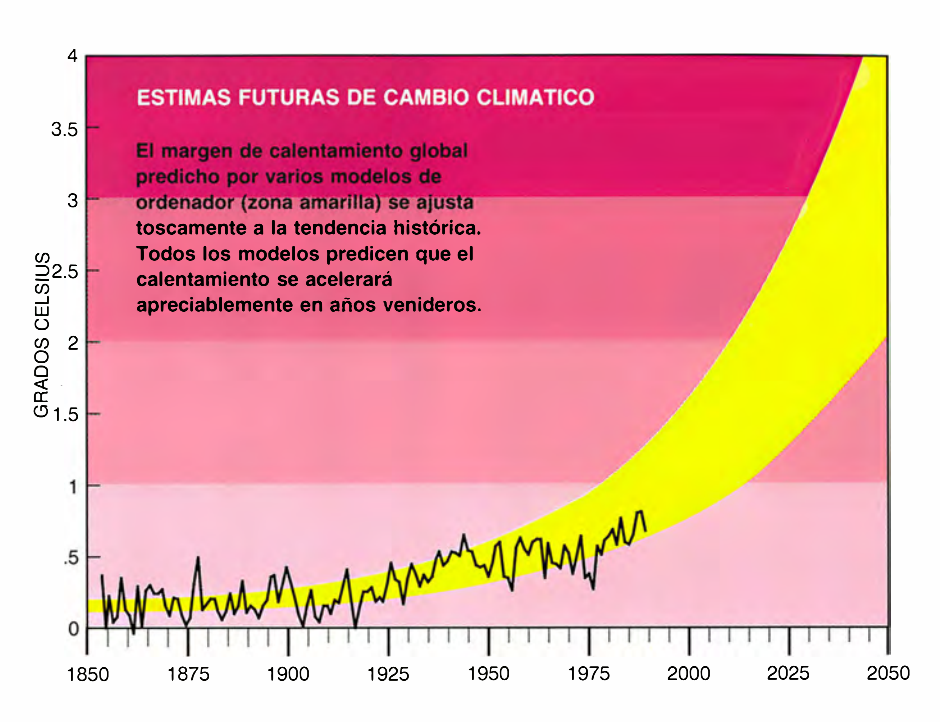
El clima terrestre responde tam-

5. FLUCTUACIONES NATURALES en la curva de temperatura, plausibles enmascaradoras del calentamiento global. Aquí las temperaturas globales se han corregido eliminando los efectos de El Niño, que rebaja la temperatura media global. Otros sucesos naturales, como las erupciones volcánicas (señaladas por marcas en la escala de abscisas), pueden producir también un efecto sobre el clima de enfriamiento a corto plazo y ocultar el calentamiento global. (Recreación de John Deecken.)

bién a diversos factores externos, uno de los cuales es la variación solar. Recientes observaciones mediante satélite han confirmado que la emisión del Sol fluctúa en torno a un 0,1 por ciento en concordancia con el ciclo de 11 años de las manchas solares, lo que representa una variación de unos 0,24 watt por metro cuadrado en la radiación que incide sobre la alta atmósfera. Si el sistema climático pudiera responder inmediatamente a los cambios de la emisión solar, el planeta se calentaría (o enfriaría) entre 0,08 y 0,24 grados Celsius en el curso del ciclo de las manchas solares. La inercia térmica de los océanos impide tal respuesta rápida; el cambio real de la temperatura global por esta causa es probablemente inferior a 0,03 grados Celsius.

Cabe también la posibilidad de que la luminosidad solar varíe en mayor cuantía a lo largo de escalas de tiempo más prolongadas. Los períodos dilatados de baja actividad de manchas solares, como los mínimos de Maunder, Spörer y Wolf (que se produjeron durante los períodos de 1645-1715, 1450-1550 y 1280-1350, respectivamente), se correlacionan con intervalos de avances generalizados de los glaciares de montaña (el último de los cuales fue la Pequeña Edad del Hielo, que duró desde mediados del siglo XVI hasta mediados del siglo XVIII, aproximadamente). Se ha sugerido que la emisión solar disminuiría entre un 0,2 y un 0,6 por ciento durante tales sucesos, y que ésa sería la causa de las variaciones climáticas. Pero no se ha observado ningún período prolongado de actividad anómala de manchas solares desde el final del mínimo de Maunder.

Las variaciones del radio solar, que aumenta y disminuye en ciclos de unos 80 años, podrían repercutir en la luminosidad, pero no está clara la intensidad del vínculo entre radio y luminosidad. El efecto podría ser apreciable, pero también despreciable. Las observaciones mediante satélite en el decenio próximo deberían resolver esas dudas.



Seguimos sin conocer bien el impacto del Sol sobre las tendencias globales de temperatura a lo largo de los últimos cien años. Parece ser pequeño. Hasta las propuestas más imaginativas entrañan fenómenos cuyos efectos son insignificantes, comparados con los de las emisiones de gases de invernadero. La magnitud más probable de la disminución de luminosidad responsable de la Pequeña Edad del Hielo, aunque mucho mayor que ninguna de las variaciones recientemente observadas, es de un watt por metro cuadrado; ello equivale a un 40 por ciento, más o menos, del cambio que se ha producido hasta la fecha por efecto de invernadero.

La incidencia de la actividad volcánica sobre el cambio climático está mejor acotada, al menos a escalas de tiempo pequeñas. Las erupciones volcánicas, que inyectan, en forma de aerosol, grandes cantidades de polvo y sulfatos en la estratosfera, pueden producir un apreciable enfriamiento a corto plazo. En ese sentido, la erupción del Krakatoa, cerca de Java, en 1883, parece que enfrió la baja atmósfera en algunas décimas de grado Celsius. El efecto comenzó a sentirse algunos meses después de la erupción y se midió durante casi dos años más. La erupción del Agung en Bali en 1963, aunque menos violenta e inyectó menos polvo en la estratosfera, produjo grandes cantidades de dióxido de azufre; sus efectos climáticos fueron similares.

Mucho más discutible resulta el efecto a largo plazo de tales erupciones. Aun cuando los aerosoles volcánicos precipiten de la estratosfera en pocos años, como parece probable, se podría, empero, argüir que la inercia térmica de los océanos modula los efectos de las erupciones de suerte tal que provoca efectos climáticos a largo plazo. Cabría, por ejemplo, atribuir parte del calentamiento que ocurrió entre 1920 y 1940 a la falta de grandes erupciones durante ese intervalo.

No hay registros continuados de concentraciones de aerosoles volcánicos —sobre todo de sulfatos— en la estratosfera, por lo que es imposible estimar con garantía su efecto a largo plazo sobre el clima. Aunque poseemos numerosas indicaciones indirectas, entre ellas los registros de erupciones, de transparencia atmosférica y de concentración de sulfatos en testigos de hielo de Groenlandia y la Antártida, las estimas deducidas de esas fuentes no guardan una buena correlación mutua. Es difícil, por tanto, deducir conclusiones seguras sobre el impacto de la actividad volcánica en el cambio climático a largo plazo.

¿Qué decir del efecto de invernadero? Al menos en este caso sí existe un buen registro de las concentraciones de los gases de invernadero durante los últimos siglos. Desde 1765, la concentración atmosférica de dióxido de carbono ha aumentado desde 280 partes por millón en volumen hasta más de 350 partes por millón. La concentración de metano se ha más que duplicado, de 800 a 1700 partes por mil millones; el óxido nitroso ha aumentado en aproximadamente un diez por ciento, de 285 a 310 partes por mil millones. Durante los últimos treinta años, las concentraciones de halocarburos han aumentado desde casi cero hasta una parte por mil millones.

Los modelos de ordenador predicen que el cambio en el balance global de radiación causado por el aumento de los gases de invernadero equivale más o menos al uno por ciento del incremento de la luminosidad solar. Los cambios producidos en los niveles de gases de invernadero podrían elevar la temperatura media global entre 0,8 y 2,6 grados Celsius (la incertidumbre hay que atribuirla a un conocimiento incompleto de las

varias clases de realimentaciones que se dan en la respuesta del clima a un estímulo exterior).

La inercia térmica de los océanos, sin embargo, impide que el clima responda inmediatamente al efecto de invernadero, y reduce el calentamiento que podía esperarse durante los últimos cien años a una cifra comprendida entre 0,5 y 1,3 grados Celsius. El calentamiento observado de unos 0,5 grados Celsius entra por los pelos dentro de las expectativas del efecto de invernadero.

De todos modos, tal compatibilidad entre las tendencias históricas al calentamiento y las predicciones de los modelos del efecto de invernadero no significa que sea indudable la existencia de éste ni que su magnitud sea relativamente pequeña. Si se tiene en cuenta la importancia de la variabilidad climática natural y la existencia de otros factores externos que pueden afectar al clima, el calentamiento observado podría seguirse atribuyendo a causas distintas del efecto de invernadero y, por supuesto, un calentamiento mayor con él relacionado podría haber quedado compensado con otras fluctuaciones climáticas.

La verdad es que muchas características del archivo histórico de temperaturas parecen entrar en conflicto con la hipótesis del invernadero. Entre 1920 y 1940, la Tierra se calentó más rápidamente de lo predicho por los modelos de invernadero, al tiempo que se enfrió entre 1940 y 1970, a pesar de que las concentraciones de gases de invernadero seguían aumentando con rapidez. Además, los registros hemisféricos discrepan también de las expectativas. Como el hemisferio austral tiene más océanos que el septentrional, debería calentarse con mayor lentitud; sin embargo, ha ido ligeramente por delante en la carrera del calentamiento. No es imposible resolver estas discrepancias, al menos de forma cualitativa: el rápido calentamiento de principios del siglo XX pudo venir causado por factores internos o, en alguna medida, por la disminución de la actividad volcánica o por variaciones de la emisión solar; el enfriamiento de entre 1940 y principios de 1970 podría obedecer, asimismo, a la variabilidad natural, superpuesta de nuevo sobre el efecto de invernadero.

La mayoría de las dudas que rodean las causas del reciente cambio climático no se despejarán nunca por falta de los datos históricos necesarios. Resulta, pues, por ahora imposible interpretar exactamente el innegable calentamiento a escala global de los últimos cien años.

El incremento de temperatura observado está en el extremo bajo del intervalo predicho por los modelos de invernadero, lo que puede inducir a pensar que tal efecto es inferior al predicho por sus modelos actuales. Pero también es posible que el efecto de invernadero sea más intenso de lo que los modelos sugieren y haya sido en parte compensado por variaciones climáticas naturales o por otros influjos antropogénicos.

Las dudas asociadas al efecto de invernadero irán cayendo en los próximos decenios gracias al perfeccionamiento de los modelos y a la recopilación de nuevos datos, lo que conducirá a mejores predicciones del cambio climático. Mientras tanto, los intentos de explicación de las pasadas variaciones de la temperatura media global están condenados a frustrarse por carecer de información sobre las causas subyacentes a la variabilidad climática natural.

Por muy insatisfactorias que sean las consecuencias de todo esto desde el punto de vista de la acción, no debería esgrimirse esa ignorancia como excusa para demorar la formulación y entrada en vigor de planes de actuación tendentes a reducir los aumentos de temperatura causados por los gases de invernadero. Cuanto más espere el mundo para tomar medidas, tanto mayor será el cambio climático que las generaciones futuras habrán de soportar. Una política de brazos cruzados sólo se justificaría si los investigadores estuvieran seguros de que la relevancia del efecto de invernadero fuera despreciable.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ANALYSIS OF THE TEMPERATURE RECORD. T. M. L. Wigley, James K. Angell y P. D. Jones en *Detecting the Climatic Effects of Increasing Carbon Dioxide*. Dirigido por M. C. MacCracken y F. M. Luther. U. S. Department of Energy, Carbon Dioxide Research Division, DOE/ER-0235, diciembre de 1985.

EMPIRICAL CLIMATE STUDIES: WARM WORLD SCENARIOS AND THE DETECTION OF CLIMATIC CHANGE INDUCED BY RADIATIVELY ACTIVE GASES. T. M. L. Wigley, P. D. Jones y P. M. Kelly en *The Greenhouse Effect, Climatic Change, and Ecosystems*. Dirigido por Bert Bolin, B. R. Döös, Jill Jäger y Richard A. Warrick. John Wiley & Sons, Inc., 1986.

GLOBAL TEMPERATURE VARIATIONS BETWEEN 1861 AND 1984. P. D. Jones, T. M. L. Wigley y P. B. Wright en *Nature*, vol. 322, n.º 6078, págs. 430-434; 31 de julio de 1986.

SUN AND DUST VERSUS THE GREENHOUSE. J. E. Hansen y A. A. Lacis en *Nature* (en prensa).

Superconductores allende el 1-2-3

El óxido de itrio1-bario2-cobre3 es sólo uno de los muchos superconductores recientes de alta temperatura. Todos contienen planos formados por átomos de cobre y oxígeno, que constituyen "autopistas" perfectas para los electrones

Robert J. Cava

Hace más de diez años, Bernard Raveau y sus colaboradores de la Universidad de Caen, en Francia, comenzaron a sintetizar una serie de compuestos formados por lantano, bario, cobre y oxígeno. Si alguno de esos materiales cerámicos se hubiera enfriado a temperaturas cercanas a 40 grados kelvin, se habría descubierto que no ofrecían resistencia al paso de la corriente eléctrica. Sin embargo, pocos físicos, químicos o investigadores expertos en materiales tenían razones para sospechar que fueran superconductores, y menos aún rondaría por su cabeza la posibilidad de que se consiguieran nunca superconductores con temperaturas de transición tan altas. Las cerámicas permanecieron en una relativa oscuridad durante varios años. En 1986, los físicos K. Alex Müller y J. Georg Bednorz, del Laboratorio de Investigación de IBM en Zürich, se dieron cuenta de que estas cerámicas eran la clave para el desarrollo de una nueva clase de superconductores de alta temperatura que revitalizaría la investigación y la tecnología de la superconductividad. Su descubrimiento originó una de las revoluciones más asombrosas en la física del estado sólido.

Espoleados por la posibilidad de encontrar el superconductor de alta temperatura definitivo, casi todo el mundo que en 1987 disponía de una tabla periódica de los elementos y un horno empezó a elaborar febrilmente compuestos exóticos que contuvieran cobre y oxígeno. La naturaleza, sin embargo, es muy caprichosa a la hora de decidir qué óxidos de cobre se pueden formar. Aunque la teoría de la química del estado sólido es una guía en la elección de elementos que puedan combinarse para sintetizar nuevos compuestos, los materiales son tan complejos que ninguna teoría puede predecir con garantía la estructura o el comportamiento de los nuevos materiales. El truco consiste en emplear juntas la química, la intuición y la suerte para encontrar la combinación adecuada de elementos que eleven todavía más la temperatura de transición.

En febrero de 1987, Maw-Kuen Wu, de la Universidad de Alabama, Ching-Wu (Paul) Chu, de la Universidad de Houston, y sus colaboradores, reemplazaron el lantano del compuesto de Bednorz-Müller por itrio —un elemento de menor tamaño del grupo de las tierras raras— y elaboraron así un superconductor cuya temperatura de transición era de 90 kelvin. Poco después, R. Bruce van Dover, Bertram Batlogg y yo, en los laboratorios AT&T Bell, determinamos que dicho superconductor era el compuesto químico ahora conocido como 1-2-3, denominación indicativa de la relación molar entre itrio, bario y cobre. El material 1-2-3 fue el primer superconductor con una temperatura de transición por encima de 77 kelvin y, por tanto, el primero que podía enfriarse de forma fácil y barata en un baño de nitrógeno líquido. Los mejores superconductores metálicos convencionales, como las aleaciones de niobio y estaño, requerían un refrigerante más caro, helio líquido, al igual que el primer superconductor de alta temperatura descubierto por Bednorz y Müller.

Durante los últimos cuatro años, los esfuerzos de miles de investigadores de todo el mundo han producido alrededor de una docena de superconductores con temperaturas de transición superiores a 40 kelvin y unos cuantos por encima de 77 kelvin. Casi todos estos descubrimientos los han hecho científicos que, experimentando sobre una idea, dieron con algo diferente, desbordados (o mejor ayudados) por la naturaleza. Hasta el momento, la temperatura de transición más alta y verdaderamente sorprendente es de unos 125 kelvin, conseguida con un compuesto de talio, bario, calcio, cobre y oxígeno.

Aunque no se conocen los límites de la superconductividad ni se comprenden siquiera las interacciones fundamentales que la originan en los superconductores cerámicos, es posible identificar las características

ROBERT J. CAVA es investigador en ciencia de materiales en los laboratorios de AT&T Bell. Ha desempeñado un papel destacado en la búsqueda de superconductores de alta temperatura. En 1978 obtuvo su doctorado en materiales cerámicos en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Durante los últimos diez años ha trabajado en el departamento de química del estado sólido en los laboratorios de AT&T Bell. Es un ávido aficionado a la astronomía.

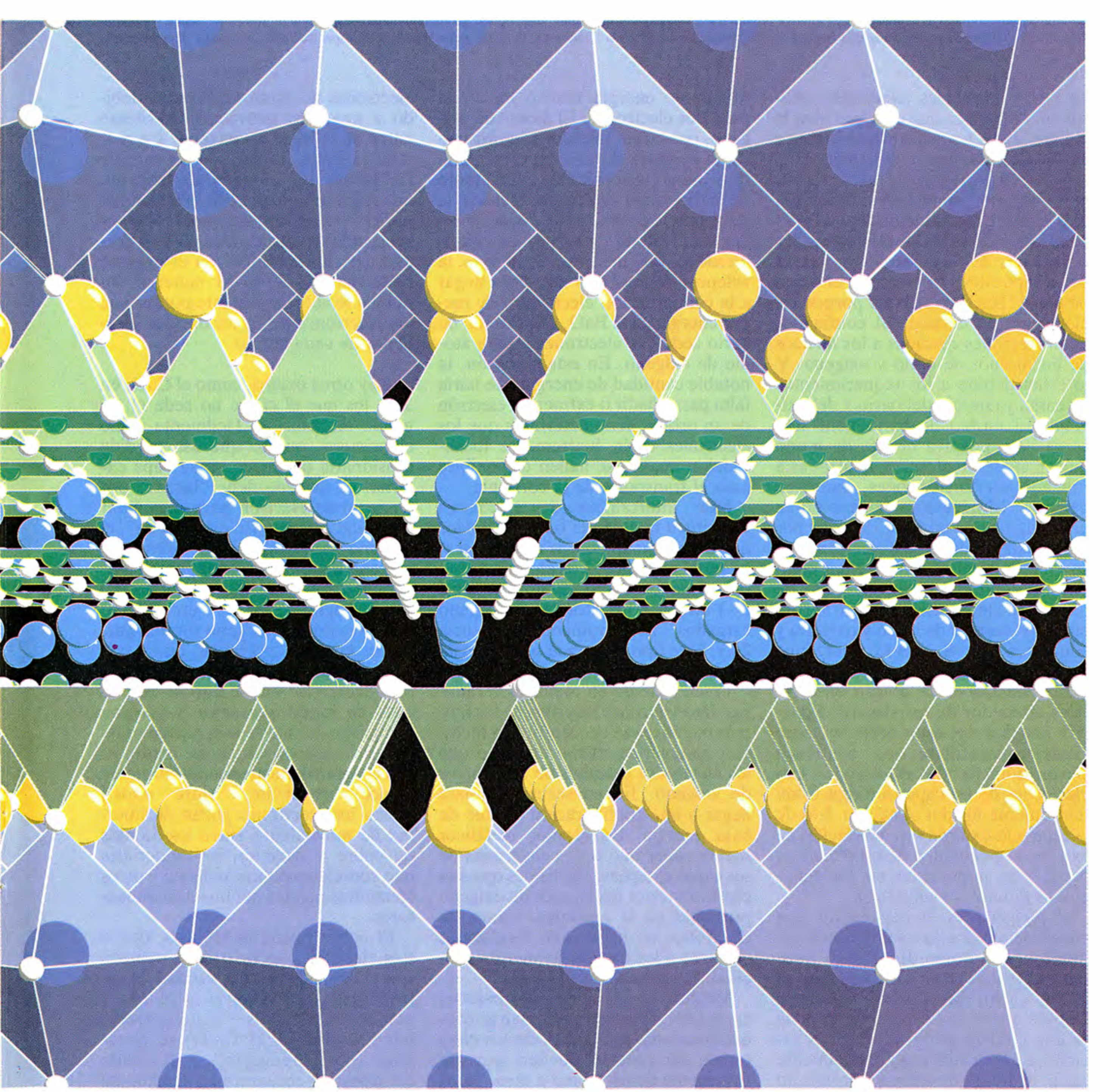


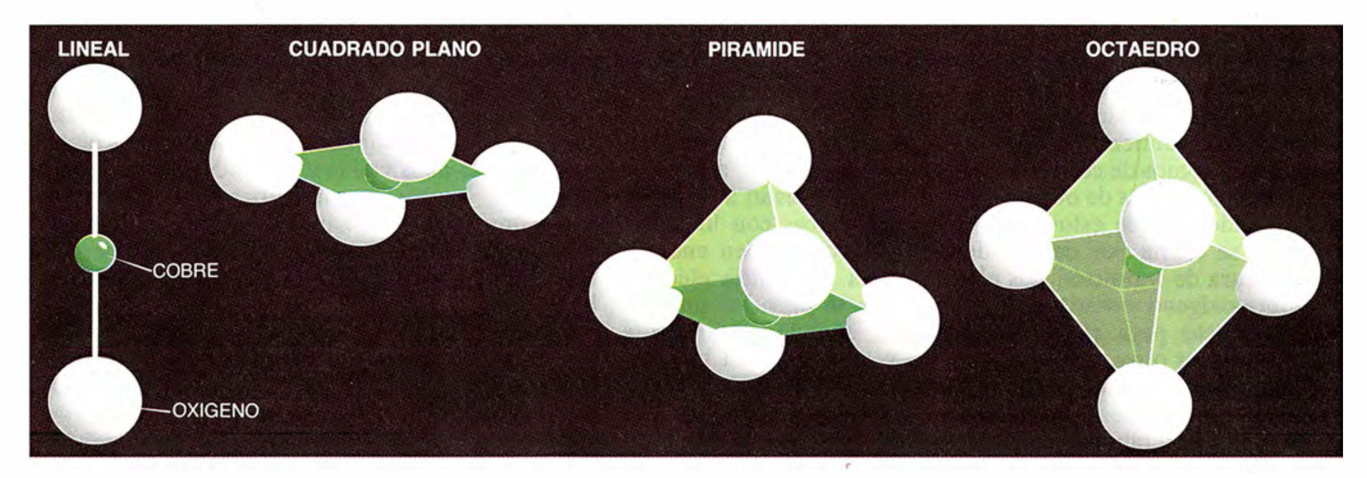
1. SUPERCONDUCTOR de talio, bario, calcio, cobre y oxígeno ($Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$). El compuesto presenta la temperatura de transición más alta conocida hasta el momento. Deja de ofrecer resistencia al paso de la corriente eléctrica cuando se enfría por debajo de 125 kelvin. Como los demás superconductores cerámicos, el compuesto de talio contiene planos formados por átomos de cobre y oxígeno que permiten la conducción de electrones a través del material.

moleculares que la favorecen o la inhiben. Cabe resaltar como la más importante que las redes cristalinas de todos los superconductores de alta temperatura contienen planos formados por átomos de cobre y oxígeno alternados con capas de otros elementos. Cuando uno de estos superconductores se enfría por debajo de su temperatura de transición, los planos de cobre-oxígeno constituyen el camino perfecto para el paso de los electrones. Los otros elementos de la red cristalina se pueden escoger y ordenar de forma que aumente o disminuya la temperatura de transición al estado superconductor.

Los materiales descubiertos por Bednorz, Müller y otros se comportan, en ciertos aspectos, como los superconductores metálicos convencionales. Cuando se les aplica un voltaje a temperatura ambiente, los electrones empiezan a moverse a su través. Al chocar con los átomos del compuesto, pierden energía, lo cual genera resistencia eléctrica. A medida que se enfría el material, la pérdida de energía y la resistencia disminuyen. Cuando la temperatura alcanza un valor inferior a la de transición, desaparece la resistencia. Los electrones sufren una transición de fase y ya no interactúan con los átomos.

Los compuestos de Bednorz-Müller forman parte del reducido grupo de materiales cerámicos que son buenos conductores. (Después de todo, las cerámicas, de lo que son los platos de la vajilla y los inodoros de nuestras casas, se caracterizan por sus propiedades aislantes.) Los metales lantano, bario y cobre reaccionan fácilmente y por separado con el oxígeno para formar el óxido de lantano, el óxido de bario y el óxido de cobre. Todos estos óxidos son aislantes, es decir, conducen muy mal la electricidad a temperatura ambiente. Sin embargo, cuando Bednorz y Müller combinaron lantano, bario, cobre y oxígeno





2. EL "CORAZON" ELECTRONICO de casi todos los superconductores de alta temperatura es el enlace químico entre el cobre y el oxígeno. Un átomo de cobre puede combinarse con átomos de oxígeno de cuatro formas diferentes, que pueden representarse mediante un poliedro de coordinación: una figura geométrica que comprende el átomo de cobre y los átomos de oxígeno colindantes, a los que se halla enlazado directamente.

en las proporciones adecuadas crearon una cerámica que conduce bien la electricidad a temperatura ambiente y es superconductora a 28 kelvin.

El que un producto cerámico sea aislante o conductor depende del comportamiento de los electrones, los portadores de carga negativa, dentro del compuesto. Por ejemplo, el óxido de bario (BaO) es aislante porque los electrones se encuentran confinados en las regiones cercanas a los núcleos de los átomos de bario y oxígeno. Y lo están debido a los requerimientos de carga y energía del bario y del oxígeno. El núcleo de bario tiene una carga neta positiva de 56, de modo que en el estado atómico, neutro, está rodeado por 56 electrones, con carga negativa. El núcleo de oxígeno posee una carga neta positiva de 8 y, por tanto, está rodeado de 8 electrones en su estado atómico. Para formar compuestos químicos como el óxido de bario, los electrones se redistribuyen entre los átomos de bario y oxígeno y adquieren así el estado energético más bajo posible.

Los electrones se ubican en orbitales alrededor de los átomos. Podemos imaginarnos estos orbitales como capas concéntricas que contienen cierto número de electrones. Los electrones de las capas internas están fuertemente ligados al núcleo. Los de la capa más externa son más fáciles de extraer y, por tanto, desempeñan un papel más importante en los fenómenos químicos y eléctricos.

El oxígeno es el pegamento que mantiene unidos los compuestos cerámicos. Un átomo de oxígeno tiene seis electrones en su capa externa, en la que caben hasta ocho electrones. Debido a que una capa externa llena es una configuración mucho más estable que la misma capa parcialmente vacía, el átomo de oxígeno alcanza un estado de energía mucho menor si gana dos electrones. El átomo de oxígeno, por tanto, prefiere adquirir una carga negativa de dos; en otras palabras, tiene "valencia" 2−. Un átomo de bario tiene dos electrones en la capa más externa, pero puede acceder a un estado de menor energía si pierde los dos electrones. Así pues, la valencia del bario es 2+. Para llegar a la configuración electrónica de menor energía en el BaO, cada átomo de bario cede dos electrones a cada átomo de oxígeno. En esta situación, la notable cantidad de energía que haría falta para añadir o extraer un electrón de un orbital lleno determina que los electrones estén fuertemente localizados y que no se hallen disponibles para el transporte de la corriente.

Este intercambio de electrones constituye también la base del enlace que mantiene unidos los átomos en el material cerámico. Los átomos de bario, cargados positivamente (valencia 2+) atraen a los átomos de oxígeno cargados negativamente (valencia 2−). Este tipo de enlace se denomina enlace iónico.

Prácticamente en todas las cerámicas, los electrones externos de los átomos metálicos se encuentran en un estado energético mucho más alto que los electrones externos de los átomos de oxígeno. En consecuencia, para llegar a una configuración estable de baja energía, los átomos metálicos suelen ceder uno o dos electrones de sus capas externas, electrones que son capturados por los átomos de oxígeno presentes en la cerámica. Como los electrones se mantienen localizados en torno a los átomos de metal y oxígeno, la cerámica es aislante.

Muchas de las cerámicas basadas en óxidos de cobre son buenas conductoras porque algunos de los electrones del material pueden moverse libremente de un átomo a otro. Estos electrones no están localizados debido a una rara interacción existente entre el cobre y el oxígeno. En materiales como el Cu_2O, el cobre cede fácilmente un electrón al oxígeno, quedándose con la capa exterior llena. De este modo, dos átomos de cobre (cada uno con valencia 1+) forman un enlace iónico con el oxígeno (con valencia 2−). El material cerámico resulta ser aislante puesto que los electrones están localizados alrededor de cada átomo.

Hay otros óxidos, como el CuO, en los que el cobre no cede el segundo electrón tan fácilmente como el primero, puesto que esa pérdida ocasionaría un hueco en su capa externa. El oxígeno debe "luchar" por un segundo electrón para completar su orbital externo. En esta "lucha", el oxígeno gana, porque un orbital de oxígeno lleno es una configuración ligeramente más estable que un orbital externo lleno de cobre. Pero si tanto el cobre como el oxígeno forman parte de una red cristalina junto con otros elementos, ese delicado equilibrio energético puede quedar desplazado de forma que cobre y oxígeno compartan los electrones que completan sus respectivas capas externas. (Al compartir electrones, se forma un enlace "covalente" entre ellos.) Como los electrones gozan de libertad de movimiento entre los átomos de cobre y oxígeno, los materiales que contengan cobre, oxígeno y otros elementos pueden ser buenos conductores.

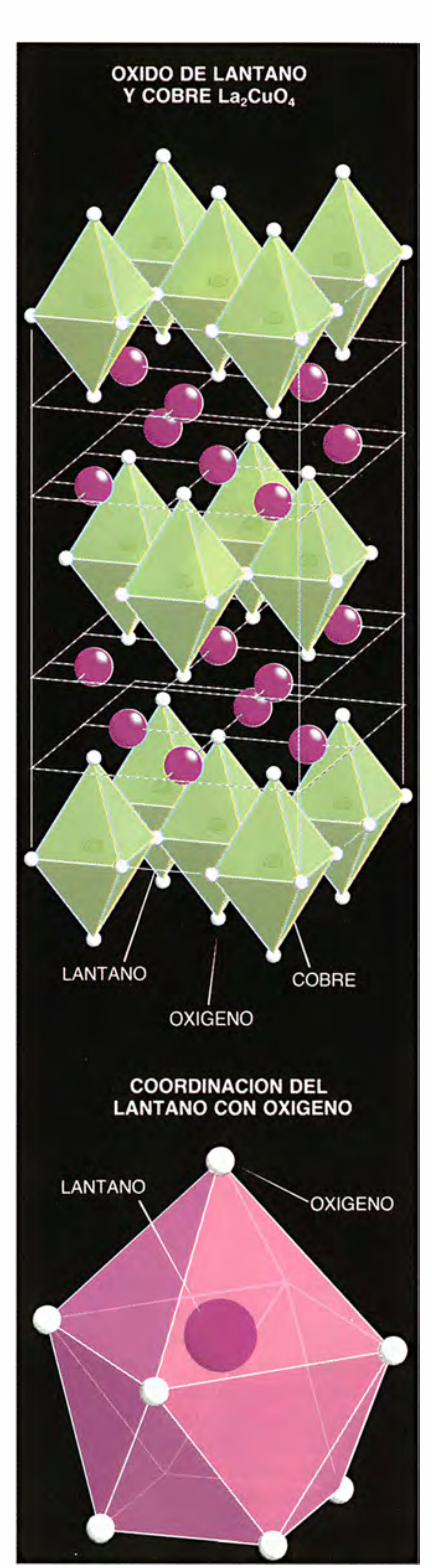
El cobre puede ceder uno, dos o tres electrones en un enlace químico con el oxígeno. El más estable de los tres estados de valencia es el 2+, y por ello el estado 1+ (que aparece, por ejemplo, en el Cu_2O) se denomina cobre "reducido", y el estado 3+ (como se encuentra en el óxido de

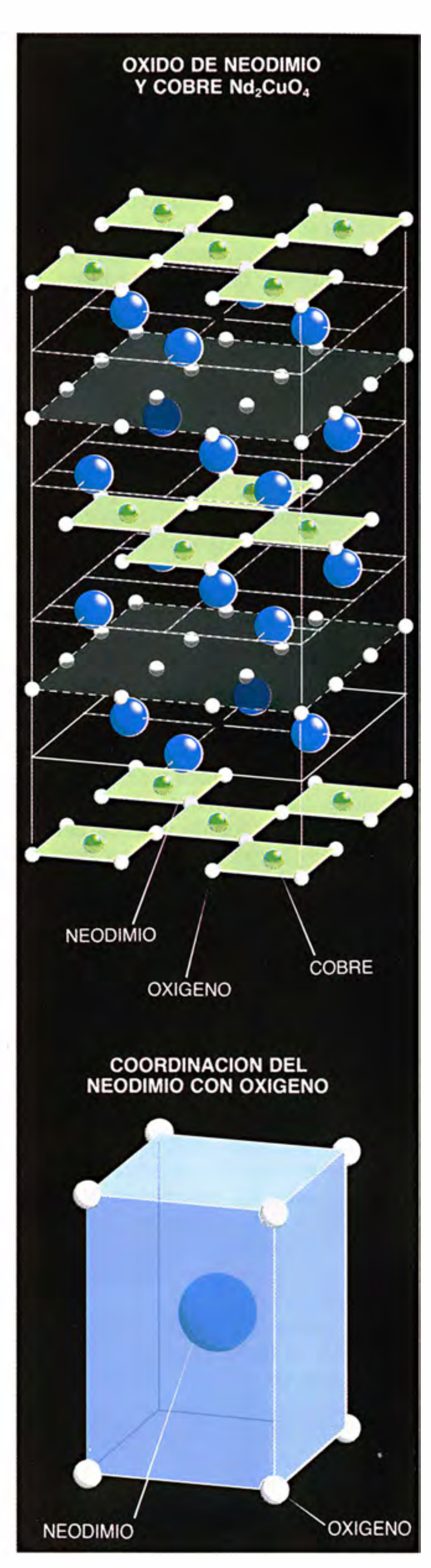
cobre y sodio, $NaCuO_2$) se denomina cobre "oxidado".

En los superconductores cerámicos, el cobre parece actuar como si poseyera una valencia fraccionaria. Esta valencia depende en gran medida de la influencia del oxígeno y demás elementos presentes en el superconductor. Cuando la valencia del cobre es 2+, los electrones se encuentran localizados en un enlace cobre-oxígeno. En algunos casos, cuando están presentes elementos oxidantes adicionales como el lantano o el bario, se pueden obtener más de dos electrones de algunos átomos de cobre, desplazando su valencia hacia 3+. En otros casos, la presencia de átomos "reductores" puede añadir electrones a algunos átomos de cobre, desplazando su valencia hacia 1+. En ambas circunstancias, los electrones no están ya localizados y pueden participar en la conducción eléctrica.

Este método de contar valencias, esencial para comprender las cerámicas superconductoras, constituye sólo una simplificación. En éstas, los átomos de oxígeno y de cobre comparten los electrones para satisfacer sus exigencias energéticas. Estos electrones compartidos se mueven entre los átomos de cobre y de oxígeno; forman un "mar" de electrones o, con mayor propiedad, una banda de conducción. Si los átomos de cobre se reducen a valencias inferiores a 2+ (esto es, si ceden, en promedio, menos de dos electrones cada uno), sólo unos pocos electrones se moverán en la banda de conducción. Si, por el contrario, los átomos de cobre se oxidan a valencias superiores a 2+, cediendo en promedio más de dos electrones, se crean zonas de carga positiva en la banda de conducción ("huecos"), antes llena de electrones. El concepto de valencia fraccionaria, o mixta, tiene sentido sólo si se considera la adición o resta de electrones de la banda de conducción.

No es el cobre el único elemento que puede presentar estados de valencia fraccionaria en presencia de oxígeno. El bismuto y el plomo poseen orbitales electrónicos que, como los del cobre, tienen requisitos energéticos similares a los del oxígeno. Bajo circunstancias apropiadas, ambos pueden formar enlaces covalentes con el oxígeno, que pueden permitir el movimiento libre de los electrones en la banda de conducción. Se han descubierto óxidos de plomo y óxidos de bismuto que son superconductores a temperaturas relativamente altas, aunque todavía se discute si tales óxidos son superconductores por los mismos motivos que los de cobre.



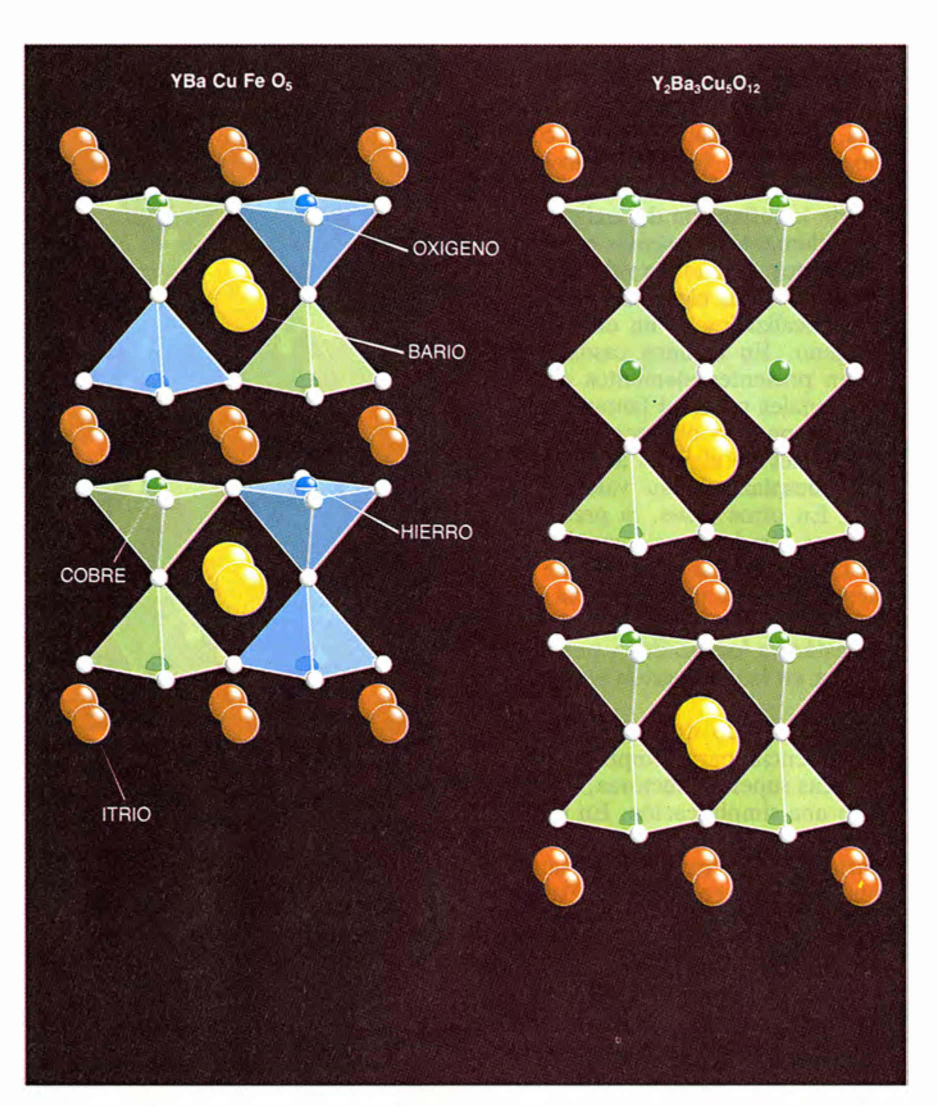


3. ESTRUCTURA CRISTALINA del óxido de lantano y cobre (La_2CuO_4) (*arriba, a la izquierda*); constituye la base de muchos superconductores. Si alguno de los átomos de lantano se reemplaza por átomos de calcio, estroncio o bario, se forma un superconductor. Abajo a la izquierda se muestra el poliedro de coordinacion del lantano con el oxígeno. Los superconductores basados en el La_2CuO_4 son conductores de tipo *p* porque albergan portadores de carga positiva, conocidos como huecos. Pueden obtenerse superconductores de tipo *n* con el óxido de neodimio y cobre (Nd_2CuO_4) (*arriba, a la derecha*) sustituyendo algunos átomos de neodimio por otros de cerio o torio. Los superconductores basados en el Nd_2CuO_4 son conductores de tipo *n* porque albergan portadores de carga negativa (electrones). Los átomos de neodimio están coordinados a ocho átomos de oxígeno (*abajo, derecha*).

La familia de superconductores descubierta por Bednorz y Müller se basa en una modificación química del óxido de lantano y cobre (La_2CuO_4), cuya estructura cristalina se muestra en la figura 3. Las estructuras de las cerámicas superconductoras suele describirse en términos de poliedros de coordinación, una noción básica de la química del estado sólido. Un poliedro de coordinación es una figura geométrica que contiene un átomo metálico y los átomos de oxígeno colindantes a los que esté enlazado directamente. Los poliedros revelan el número de átomos de oxígeno que el átomo metálico prefiere en su entorno más próximo, número que puede variar considerablemente; por ejemplo, desde dos oxígenos en el caso del cobre (en estado de valencia 1+) a 15 para el cesio (valencia 1+). El número de átomos de oxígeno a los que se coordina un ion en cada caso depende del tamaño de dicho ion y de los requisitos particulares de los otros átomos metálicos del óxido.

En el La_2CuO_4, los átomos de cobre están coordinados a seis oxígenos situados en los vértices de un octaedro alargado. Debido a las características energéticas de la capa más externa del cobre en su estado de valencia 2+, hay dos átomos de oxígeno situados en vértices opuestos que están siempre más alejados del cobre que los cuatro oxígenos de los vértices restantes. Esta distorsión estructural, conocida como efecto Jahn-Teller, fue lo primero que incitó a Bednorz y Müller a centrar su atención en los óxidos de cobre como candidatos a superconductores. Este efecto sugiere que los electrones interactúan fuertemente con las posiciones atómicas del cobre y del oxígeno en la red cristalina, interacción considerada muy importante para que aparezca la superconductividad.

Los octaedros cobre-oxígeno del La_2CuO_4 se unen entre sí a través de los átomos de oxígeno situados en los vértices más cercanos al cobre; los átomos de cobre y los de oxígeno más próximos se disponen en un mismo plano. Este plano de cobre-oxígeno constituye el "corazón" electrónico de todos los óxidos superconductores de cobre conocidos y es la zona microscópica de la estructura cristalina donde se originan los portadores de carga superconductores.



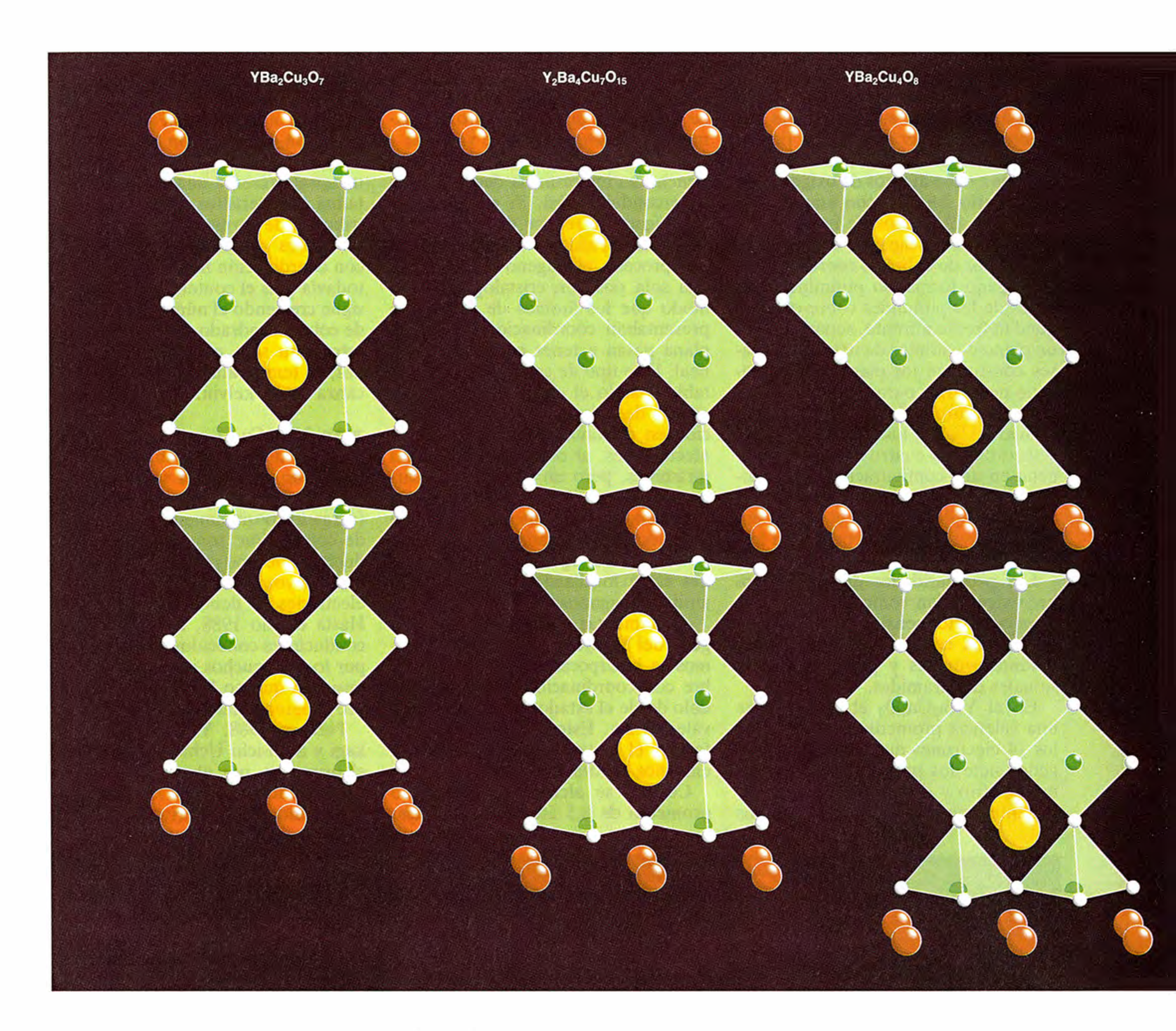
4. COMPUESTO 1-2-3 ($YBa_2Cu_3O_7$), miembro de lo que los químicos llaman una serie homóloga. Puede obtenerse un miembro de la serie a partir de otro por simple adición o sustracción de componentes estructurales simples. Tres de los pertenecientes a ésta —$YBa_2Cu_3O_7$, $Y_2Ba_4Cu_7O_{15}$ e $YBa_2Cu_4O_8$— son superconductores que tienen temperaturas de transición superiores a los 77 kelvin. No se sabe todavía si existen los compuestos $YBaCu_2O_5$ e $Y_2Ba_3Cu_5O_{12}$. Las características estructurales del $YBaCu_2O_5$ se suponen similares a las del $YBaCuFeO_5$, que no es superconductor.

Una característica notable de la estructura cristalina del La_2CuO_4 es que los poliedros de coordinación del lantano y del cobre se combinan de una forma que llena el espacio tridimensional por medio de estructuras básicamente bidimensionales. El resultado es que los planos de cobre y oxígeno se intercalan con la doble capa inerte de lantano y oxígeno.

El óxido de cobre y lantano no es en sí mismo superconductor, debido a la interacción existente entre los electrones de las capas externas de los átomos de cobre cercanos. Cada cobre cede dos electrones al oxígeno y conserva nueve electrones en su capa externa, cada uno de los cuales posee un momento magnético, es decir, se comporta como un pequeño imán con polos norte y sur. La energía correspondiente a la interacción magnética entre estos electrones es mínima cuando ocho de ellos se aparean, es decir, sus momentos magnéticos (los polos de estos pequeños imanes) se anulan al alinearse en direcciones opuestas. Cuando los electrones que quedan sin aparear de los átomos de cobre adyacentes interactúan y se alinean, sus momentos magnéticos apuntan en direcciones opuestas. Este tipo de alineamiento, denominado antiferromagnetismo, inmoviliza los electrones en la red cristalina y elimina la posibilidad de superconductividad; de hecho, de cualquier tipo de conductividad.

La superconductividad sólo aparece cuando se destruye el antiferromagnetismo. Por este motivo, son muchos los que opinan que los orígenes del magnetismo y de la superconductividad a alta temperatura están íntimamente relacionados. Hay incluso quienes consideran esta relación un tanto siniestra, apodando al magnetismo y la superconductividad como el "Jekyll y el Hyde" de la superconductividad a alta temperatura.

Es posible modificar la estructura cristalina del La_2CuO_4 de modo que se elimine el antiferromagnetismo y



aparezca la superconductividad. Bednorz y Müller crearon su famoso superconductor reemplazando algunos de los átomos de lantano por átomos de bario. La fórmula de tal compuesto es $La_{2-x}Ba_xCuO_4$.

Este óxido mantiene la neutralidad de carga si, por cada átomo de bario que reemplaza a un átomo de lantano, se oxida un átomo de cobre del estado 2+ al 3+. El electrón extra cedido por el cobre no se localiza, sino que pasa a formar parte de la banda de conducción. Una vez el cobre alcanza una valencia crítica, como de 2,2+, desaparece el antiferromagnetismo y aparece la superconductividad.

El cobre del $La_{2-x}Ba_xCuO_4$ está coordinado con seis átomos de oxígeno que constituyen los vértices de un octaedro alargado. Puesto que el número de coordinación aumenta aproximadamente de un modo proporcional al tamaño del átomo, los átomos de lantano, mayores que los de cobre, están coordinados a nueve átomos de oxígeno. Los átomos de bario, semejantes en tamaño a los de lantano, también están coordinados a nueve átomos de oxígeno. Por tanto, dentro de la red cristalina, los átomos de bario pueden ocupar las mismas posiciones que los de lantano; de hecho, se distribuyen al azar en la estructura del cristal. Este tipo de distribución atómica en posiciones cristalográficas fijas se denomina disolución sólida. (La disolución líquida consiste en una distribución al azar de iones en posiciones también distribuidas aleatoriamente.)

La noción de disolución sólida es muy importante en la aparición de superconductividad en los óxidos de cobre. Como regla general, las disoluciones sólidas no se dan, a menos que los tamaños de los iones, así como los tipos de enlace que forman, sean relativamente parecidos. Por ejemplo, el bario, estroncio o calcio pueden formar disoluciones sólidas en el La_2CuO_4, reemplazando a algunos átomos de lantano. Cuando el estroncio sustituye a uno de cada nueve átomos de lantano en la estructura del La_2CuO_4, el resultado es el óxido $La_{1,8}Sr_{0,2}CuO_4$, en el que la valencia del cobre es 2,2+. La temperatura de transición al estado superconductor de este compuesto es de 40 kelvin, la más alta obtenida de entre todas las disoluciones sólidas del La_2CuO_4.

A diferencia de las disoluciones sólidas que hacen superconductor al La_2CuO_4, el $YBa_2Cu_3O_7$ (el compuesto 1-2-3) posee una estructura cristalina completamente ordenada

que consiste en la sucesión de planos de iones de itrio, bario y cobre [*véase la figura 4*], sin que existan mezclas de átomos metálicos en las diversas posiciones cristalográficas. Los pequeños iones itrio 3+ están siempre enlazados a ocho átomos de oxígeno; los iones bario 2+, que son mayores, se enlazan a 10 átomos de oxígeno. Situados entre las capas de bario e itrio, los átomos de cobre se coordinan con el oxígeno formando pirámides. Las bases de las pirámides cobre-oxígeno quedan frente a frente, separadas por un plano de átomos de itrio. Estas bases constituyen los planos cobre-oxígeno necesarios para la superconductividad. Entre cada dos capas consecutivas de bario, los átomos de cobre se coordinan a cuatro átomos de oxígeno en una configuración cuadrado-plana de tipo diamante. Estos cuadrados de tipo diamante se conectan entre sí a través de los vértices para formar cadenas.

Las peculiaridades del enlace cobre-oxígeno dan como resultado que el espacio tridimensional se llene mediante una combinación de cadenas unidimensionales y planos bidimensionales de pirámides.

En el $YBa_2Cu_3O_7$ el cobre posee una valencia promedio de 2,33+ (de los 14 electrones que necesita el oxígeno, siete los proporcionan un átomo de itrio y dos de bario; los siete restantes son cedidos por tres átomos de cobre). Se ha demostrado que tanto los átomos de cobre de las cadenas como los que se hallan en la base de las pirámides presentan aproximadamente el mismo estado de valencia.

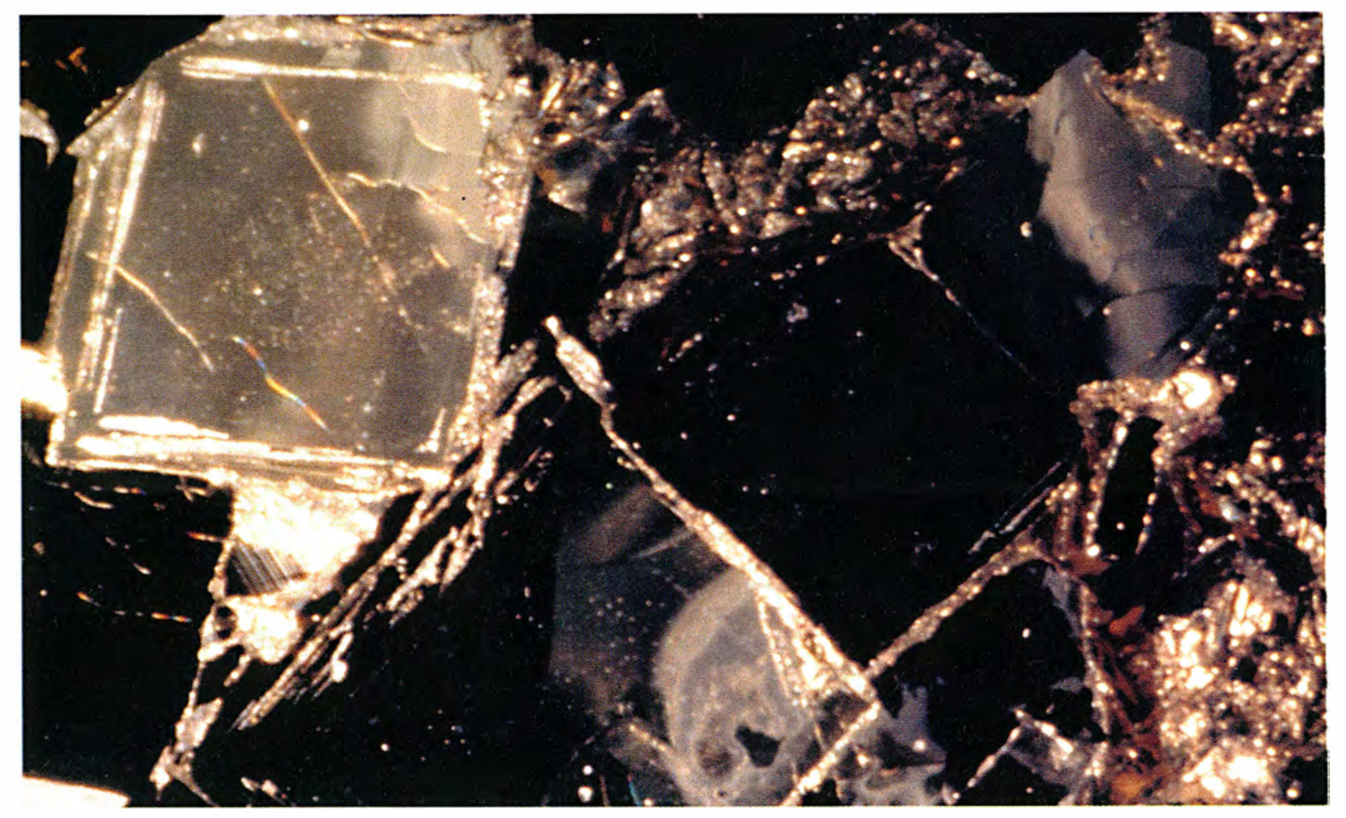
Los siete oxígenos del $YBa_2Cu_3O_7$ tienen una importancia decisiva en la superconductividad. Si el contenido de oxígeno se reduce de siete a seis, se obtiene el aislante $YBa_2Cu_3O_6$. En este proceso, el oxígeno se elimina de una sola posición cristalográfica, de modo que los átomos de cobre que presentaban coordinación cuadrado-plana pasan a tener coordinación lineal. Este tipo de coordinación es estable cuando el cobre se halla en el estado de valencia 1+. La disminución en el contenido de oxígeno no afecta, pues, al cobre que forma las pirámides, pero un recuento de cargas revela que en este caso el estado de valencia de los átomos de cobre asociados a las pirámides pasa a ser 2+. En tal configuración, los electrones están localizados por efecto del antiferromagnetismo.

Al aumentar el contenido en oxígeno del $YBa_2Cu_3O_6$, los nuevos átomos se incorporan alrededor del cobre con coordinación lineal, oxidándolo desde el estado de valencia 1+ a valencia 2+. Estos átomos tienden a formar el mayor número posible de entornos cuadrado-planos.

Cuando se alcanza un contenido promedio de 6,5 átomos de oxígeno por cada tres de cobre, el oxígeno extrae suficientes electrones de los átomos de cobre de las pirámides para dar lugar a un material superconductor: $YBa_2Cu_3O_{6,5}$, con una temperatura de transición de 60 kelvin. Este material presenta una estructura cristalina característica, en la que se distribuyen de forma ordenada cadenas de cobres cuadrado-planos y cobres con coordinación lineal. Al aumentar todavía más el contenido de oxígeno, sigue creciendo el número de cadenas de cobres cuadrado-planos; cuando la estructura sólo contiene estas cadenas, la temperatura de transición alcanza los 90 kelvin.

En $YBa_2Cu_3O_7$ y $La_{1,8}Ba_{0,2}CuO_4$, los átomos de cobre presentan un estado de valencia superior a 2+. Ello implica la existencia de huecos (cargados positivamente) en la banda de conducción; son, pues, superconductores de tipo *p*. Los superconductores cuyos portadores de carga son electrones se denominan de tipo *n*. Hasta el año 1988, todos los superconductores conocidos eran de tipo *p*, por lo que muchos investigadores supusieron que no había óxidos de cobre superconductores de tipo *n*.

Pero en 1988, Y. Tokura, H. Takagi y Shin-ichi Uchida descubrieron el primer y, por ahora, único óxido superconductor de tipo *n*. Este nuevo superconductor se deriva de un óxido



5. LOS SUPERCONDUCTORES DE ALTA TEMPERATURA como éste, material compuesto de plomo, estroncio, disprosio, calcio, cobre y oxígeno ($Pb_2Sr_2Dy_{1-x}Ca_xCu_3O_8$), suelen formar cristales rectangulares. Los cristales mostrados en la figura presentan unos 100 micrometros de espesor.

COMPOSICION BASICA DE OXIDOS DE COBRE SUPERCONDUCTORES Y DE ALGUNAS DE SUS VARIANTES

ESTRUCTURA BASE	SUSTITUCIONES	RANGOS DE TEMPERATURAS DE TRANSICION (KELVINS)	COMENTARIOS
$La_{2-x}Ba_xCuO_4$	Ca o Sr	20–40	UNA CERAMICA COMPUESTA DE La, Ba, Cu y O FUE EL PRIMER OXIDO DE COBRE SUPERCONDUCTOR DESCUBIERTO.
$Nd_{2-x}Ce_xCuO_{4-y}F_y$	Pr, Sm o Eu Th	10–25	A ESTA FAMILIA PERTENECE LA UNICA CERAMICA SUPERCONDUCTORA DE TIPO *n*.
$La_{1.8-x}Sm_xSr_{.2}CuO_4$	Eu, Gd, Tb o Dy	20	
$YBa_2Cu_3O_7$	La, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Er, Tm, Yb o Lu Cu_4O_8 o Cu_7O_{15}	80–93	EL $YBa_2Cu_3O_7$ FUE EL PRIMER SUPERCONDUCTOR QUE SE DESCUBRIO CON UNA TEMPERATURA DE TRANSICION SUPERIOR A LOS 77 KELVINS.
$Bi_2Sr_2CuO_6$	$CaCu_2O_8$ o $Ca_2Cu_3O_{10}$	0–110	
$Tl_2Ba_2CuO_6$	$CaCu_2O_8$ o $Ca_2Cu_3O_{10}$	80–125	EL $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$ TIENE LA TEMPERATURA DE TRANSICION MAS ALTA DE TODOS LOS SUPERCONDUCTORES CONOCIDOS.
$TlBa_2Cu_2O_5$	$CaCu_2O_7$, $Ca_2Cu_3O_9$ o $Ca_3Cu_4O_{11}$	0–122	
$Pb_2Sr_{2+x}Pr_{1-x}Cu_3O_8$	Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er o Tm	70–85	
$Bi_2Sr_2Sm_{2-2x}Ce_{2x}Cu_2O_{10}$	Eu o Gd	20–25	
$Ba_{1.33}Nd_{.67}Sm_{1.33}Ce_{.67}Cu_3O_9$	Sm, Eu o Gd Nd, Eu o Gd	40	
$La_{2-x}Sr_xCaCuO_6$	NINGUNA CONOCIDA	60	

de neodimio y cobre (Nd_2CuO_4). La estructura del Nd_2CuO_4 es parecida a la del La_2CuO_4, pero mientras el lantano prefiere rodearse de nueve oxígenos, el ion neodimio, más pequeño, se coordina normalmente a ocho. En el óxido Nd_2CuO_4, los átomos de oxígeno se disponen alrededor del neodimio formando un prisma cuadrado. En virtud de ello, los átomos de cobre se coordinan a cuatro átomos de oxígeno, en un poliedro de coordinación cuadrado-plana.

En los superconductores que se basan en el Nd_2CuO_4, parte de los átomos de neodimio se sustituyen por átomos de cerio o torio, formando una disolución sólida. Cerio y torio poseen valencia 4+ y un tamaño adecuado para reemplazar algunos de los iones neodimio, que presentan valencia 3+. Así se obtienen las disoluciones sólidas $Nd_{2-x}Ce_xCuO_4$ y $Nd_{2-x}Th_xCuO_4$. Para un valor de x de 0,17 se obtienen las temperaturas de transición más altas, próximas a los 25 kelvin. Se están investigando estos materiales, ya que poseen peculiaridades químicas muy sutiles, que tienen repercusión en la naturaleza de los portadores de carga.

Los superconductores que presentan las temperaturas de transición más altas conocidas fueron descubiertos en 1988 por Allen M. Hermann y sus colaboradores de la Universidad de Arkansas. Se componen de talio, bario, calcio, cobre y oxígeno. Su estructura cristalina confirma que la clave estructural de la alta temperatura de transición son los planos que contienen átomos de cobre y oxígeno.

En estos compuestos, el talio se coordina al oxígeno formando grandes octaedros. Los octaedros talio-oxígeno forman un plano que descansa sobre un plano de octaedros o pirámides cobre-oxígeno. Poseen la fórmula $Tl_mBa_2Ca_{n-1}Cu_nO_{m+2n+2}$. El subíndice m indica el número de capas de octaedros talio-oxígeno. Sólo se conocen compuestos con una o dos de estas capas. El número de capas de cobre (n) puede variar de una a cuatro. Todos los compuestos de la serie son superconductores a alta temperatura, correspondiendo la temperatura de transición más alta, 125 kelvin, al óxido $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$.

Los óxidos de cobre superconductores que se han descubierto últimamente poseen estructuras más complejas que sus predecesores, pero siguen estando constituidos por planos de cobre y oxígeno electrónicamente activos. Estos planos están intercalados entre otras capas, que actúan como separadoras y, lo que es más importante, como reservas de carga positiva o negativa. El estado electrónico de estas capas determina la carga de los planos cobre-oxígeno y la temperatura de transición del compuesto.

Hace más de 15 años que Arthur W. Sleight y sus colaboradores de Du Pont elaboraron una cerámica superconductora compuesta de bario, plomo, bismuto y oxígeno. Aunque su temperatura de transición era de sólo 12 kelvin, fue el compuesto que indujo a Bednorz y Müller a buscar nuevas cerámicas superconductoras. En el año 1988 mis colegas de los laboratorios AT&T Bell y yo descubrimos que un compuesto de bario, bismuto y oxígeno era superconductor a la sorprendente temperatura de 30 kelvin. Estos materiales poseen grandes semejanzas con los óxidos de cobre. Sólo el tiempo nos dirá si éstos y otros materiales por conocer nos ofrecerán nuevas vías hacia la superconductividad de alta temperatura.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

STRUCTURAL CHEMISTRY AND THE LOCAL CHARGE PICTURE OF COPPER OXIDE SUPERCONDUCTORS. R. J. Cava en *Science*, vol. 247, n.º 4943, págs. 656-662; 9 de febrero de 1990.

CHEMISTRY OF SUPERCONDUCTOR MATERIALS. Dirigido por Terrell Vanderah. Noyes Publications (en prensa).

Infecciones asociadas con el SIDA

Mientras se consigue domeñar al virus del SIDA, la esperanza y calidad de vida de los pacientes dependen en gran medida de los avances en la terapia de las infecciones oportunistas

John Mills y Henry Masur

El virus de la inmunodeficiencia humana (VIH), causante del SIDA, no es responsable directo de la mayoría de las enfermedades y casos de muerte asociados con el síndrome de inmunodeficiencia adquirida (SIDA). El VIH puede provocar directamente daños en órganos. No sólo eso. Al minar progresivamente la capacidad de respuesta del sistema de defensas del cuerpo, prepara el terreno para el desarrollo de infecciones oportunistas, esto es, invasiones de microorganismos que proliferan sin tasa con el debilitamiento del sistema inmune. Este tipo de infecciones, que rara vez producen enfermedades —deterioro de la función orgánica— en personas con un sistema inmune normal, es responsable de casi el 90 por ciento de la mortalidad asociada al SIDA (estadio final de la infección del VIH).

Las drogas antivíricas que son eficaces contra el VIH, como la zidovudina (AZT), no erradican por completo el VIH, pero retrasan la degeneración del sistema inmune asociada con el VIH, y, por tanto, los posibles efectos de las infecciones oportunistas. Mientras no haya un remedio contra las infecciones del VIH, sin embargo, la esperanza y calidad de vida de los pacientes dependerán, en gran medida, de las terapias que impidan, específicamente, las distintas infecciones oportunistas, o que las puedan tratar con mayor eficacia.

Las investigaciones relacionadas con dichas terapias se han multiplicado notablemente en los últimos 5 o 10 años, y ello ha permitido mejorar el tratamiento de los pacientes. Así, al comienzo de la epidemia del SIDA, no había forma de combatir las infecciones graves de citomegalovirus, virus herpes que en los pacientes inmunoafectados producen ceguera o dañan el aparato digestivo y pulmones. En la actualidad, existe ya una droga autorizada y otra ampliamente utilizada para la terapia aguda y prevención de las recaídas. Hasta hace poco, el 85 por ciento de los infectados por el VIH padecían, al menos una vez, una neumonía producida por *Pneumocystis carinii*. Hoy, puede prevenirse con medicación dos tercios o más de tales episodios.

Las infecciones oportunistas asociadas con el VIH, muy dispares, comparten, sin embargo, ciertas características. Por ejemplo, la mayoría se producen en personas cuya inmunidad está también deteriorada por otras causas, como es el caso de los que toman drogas inmunodepresoras para prevenir el rechazo en los trasplantes de órganos. (Hay, no obstante, excepciones. Por razones desconocidas, varias enfermedades observadas recientemente en pacientes sidosos son raras en otros individuos inmunosuprimidos.)

Es cierto también que las enfermedades infecciosas asociadas con el VIH son causadas por organismos muy comunes. La incidencia de las mismas enfermedades varía de una región a otra, igual que ocurre con los casos de endemismos de los correspondientes microbios responsables. Las enfermedades representan muchas veces la reactivación de infecciones latentes, controladas por el sistema inmune del paciente antes de la adquisición del VIH.

Como norma, las infecciones que acosan a los sidosos son aquellas que controla la respuesta inmune mediada por células del tipo de los linfocitos *T* y los macrófagos, células que son diezmadas por el VIH. Por contra, las infecciones (muchas de las causadas por bacterias) erradicadas primariamente por el otro componente principal del sistema inmune —el mediado por anticuerpos—, o por defensas no específicas, se suelen tolerar bastante bien, al menos durante un tiempo.

Sólo se conoce de forma parcial la manera en que el VIH afecta a la función inmune celular. Se sabe que el virus elimina gradualmente la subserie de células *T* portadoras del receptor CD4. Esta pérdida debilita, así se supone, la respuesta inmune mediada por células, ya que las células *T* CD4 positivas (CD4+), las "coadyuvantes", controlan la actividad de otros muchos componentes de la respuesta inmune celular. No obstante, a menudo se observa cierta disfunción inmune incluso antes de que se evidencie la merma de las células *T* CD4+, lo que indica que la pérdida de células *T* coadyuvantes no es la única causa de la ruina de la función.

JOHN MILLS y HENRY MASUR no trabajan juntos, pero tienen un objetivo común: desarrollar terapias más eficaces contra las infecciones oportunistas asociadas con el SIDA. Mills se doctoró en medicina, en 1966, por la Universidad de Harvard; en la actualidad es profesor de medicina y microbiología en la de California en San Francisco, además de jefe de la división de enfermedades infecciosas en el Hospital General de esa ciudad. Masur terminó la carrera de medicina en la Universidad de Cornell en 1972, donde permaneció durante varios años. Dirige hoy el departamento de cuidados intensivos del Instituto Nacional de la Salud.

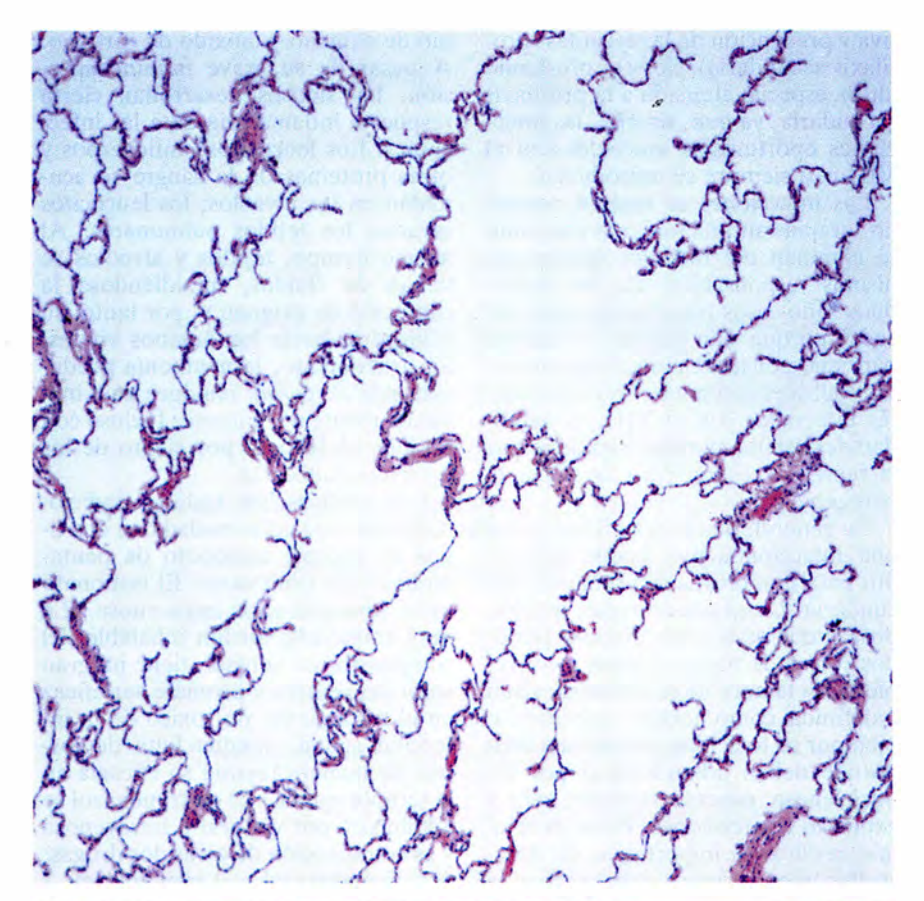
Los investigadores han descubierto también que el desarrollo de ciertas infecciones oportunistas va asociado a la concentración de células *T* CD4+ en sangre. Los individuos sanos tienen, aproximadamente, unas 1000 células de ese tipo por milímetro cúbico de sangre. En los individuos infectados por el VIH, el número disminuye una media de 40 a 80 cada año.

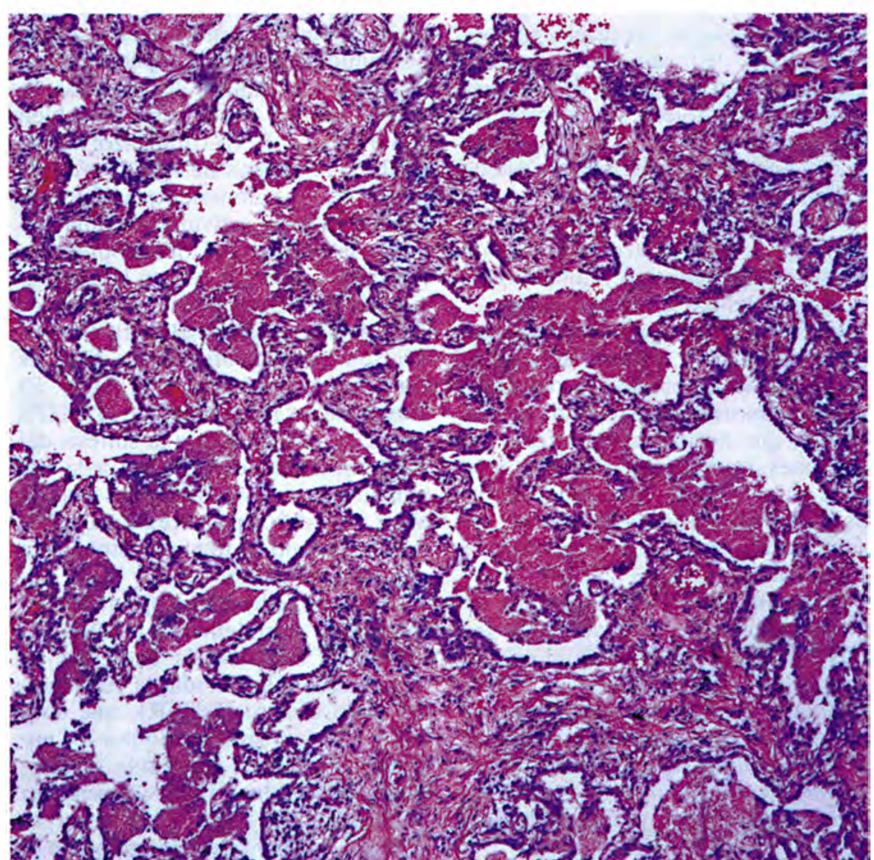
Las primeras infecciones suelen aparecer cuando el número de células oscila entre 400 y 200 por milímetro cúbico. Estas primeras suelen ser infecciones de la piel y de las membranas mucosas, relativamente benignas pero molestas. Son infecciones del tipo del afta (dolorosas ulceraciones de la boca causadas por el hongo *Candida albicans*), zoster o zona (infección de los nervios y piel producida por el herpes zoster), pie de atleta insólitamente grave (causado por varios tipos de hongos) y leucoplaquia (lunares blanquecinos en la lengua causados por el virus de Epstein-Barr).

Ante la manifestación de tales síntomas, se dice que la persona padece un cuadro asociado al SIDA (CAS). Lo mismo ocurre con individuos que sufren fiebres crónicas inexplicables, diarreas, sudoraciones nocturnas o pérdida de peso. Al par que merma la inmunidad, se desarrollan infecciones oportunistas más graves, que van definiendo al SIDA. Entre éstas se incluyen, a menudo, tres "asesinas" principales: la neumonía producida por *P. carinii*, la meningitis criptocóccica (producida por un hongo) y la toxoplasmosis (una infección parasitaria del cerebro). En el pasado, sólo estas tres infecciones eran responsables del 50 al 70 por ciento de los casos de muerte de pacientes con SIDA, en los Estados Unidos.

John P. Phair y sus colegas, de la Universidad del Noroeste, han demostrado que el riesgo de neumonía producida por *P. carinii* aumenta espectacularmente cuando el número de células *T* CD4+ baja de 200 por milímetro cúbico. Sin terapia preventiva, más de una quinta parte de los pacientes con menos de 200 células acusarán un primer ataque de neumonía antes de un año. El riesgo de contraer enfermedades debidas a otras infecciones, como las causadas por los citomegalovirus, no aumenta hasta que la concentración de *T* CD4+ no baja de 100 células.

La aproximación ideal para controlar las infecciones oportunistas del SIDA abarca tres etapas: prevención de la infección (profilaxis primaria), tratamiento de cualquier infección ac-





1. LOS ALVEOLOS, sacos de aire de los pulmones, que contienen sólo gases (*áreas claras*) en los individuos sanos (*arriba*), se llenan de fluidos y desperdicios (*rosa*) en pacientes con neumonía producida por *Pneumocystis carinii* (*abajo*), una de las principales infecciones oportunistas del SIDA.

tiva y prevención de las recaídas (profilaxis secundaria). Se está prestando ahora especial atención a la profilaxis secundaria, ya que, sin ella, las infecciones oportunistas asociadas con el VIH casi siempre se reproducen.

Las infecciones se repiten porque las terapias antimicrobianas raramente eliminan del todo los microorganismos responsables. En los individuos sanos esos tratamientos son eficaces porque dan tiempo al cuerpo para que ponga en marcha sus defensas contra el patógeno. En los pacientes infectados con el VIH, la debilidad del sistema inmune impide reunir la fuerza necesaria para erradicar el patógeno.

En general, una droga eficaz contra una infección activa puede resultar útil para una profilaxis primaria o secundaria. Desgraciadamente, muchas drogas que se toleran durante períodos cortos de tiempo tienen inconvenientes a la hora de su administración indefinida como terapia preventiva, bien por su toxicidad potencial o bien porque deban administrarse por vía intravenosa, proceso molesto, caro y expuesto a infecciones. Estos problemas resaltan la importancia de desarrollar nuevas drogas para cada una de las principales infecciones oportunistas del SIDA. Se precisan opciones alternativas, de forma que un paciente que no responda a uno de los compuestos, o no tolere sus efectos secundarios o su interacción con otras drogas (como la zidovudina), pueda recurrir a otras terapias.

Esa gestión de control tripartita de las principales infecciones oportunistas del SIDA ha dado buenos resultados en el caso de la neumonía producida por *P. carinii*, aunque la estrategia de supervivencia del organismo es bastante misteriosa. El patógeno, que normalmente infecta los pulmones (aunque pueda afectar a otros sitios), suele ser incluido entre los parásitos, aunque los estudios recientes apuntan la posibilidad de que se trate de un hongo.

P. carinii pasa probablemente de una persona a otra a través de las gotitas exhaladas del aire, igual que se transmite la tuberculosis o la gripe. Aunque se cree que la mayoria de los adultos portan una pequeña cantidad de *P. carinii* en sus pulmones, no se ha descrito nunca un solo caso de *P. carinii* en una persona inmunológicamente normal.

En los individuos inmunoafectados, estos organismos invaden los alveolos, o bolsas de aire de los pulmones, donde se produce el intercambio de oxigeno y dióxido de carbono. A pesar de su grave inmunosupresión, los sidosos desarrollan cierta respuesta inflamatoria ante las infecciones. Los leucocitos, anticuerpos y otras proteínas de la sangre se acumulan en los alveolos; los leucocitos invaden los tejidos pulmonares. Al mismo tiempo, tejidos y alveolos se llenan de fluidos, impidiéndose la captación de oxígeno y, por tanto, su transporte hacia los órganos vitales. Sin tratamiento, la neumonía producida por *P. carinii* conduce casi inevitablemente a la muerte. Incluso con terapia, el 10 o 20 por ciento de los pacientes fallecerán.

Los médicos han tratado tradicionalmente esta enfermedad con dos tipos de drogas: isetionato de pentamidina y co-trimoxazol. El isetionato es de administración intravenosa. (La muy anunciada versión inhalable del compuesto, en aerosol, tiene un gran valor preventivo y promete ser eficaz en el tratamiento no tóxico de la infección aguda, aunque falta demostrar de manera tajante su eficacia en la terapia aguda.) El co-trimoxazol se administra por vía oral o intravenosa y es combinación de otras dos drogas: el sulfametoxazol y el trimetoprim.

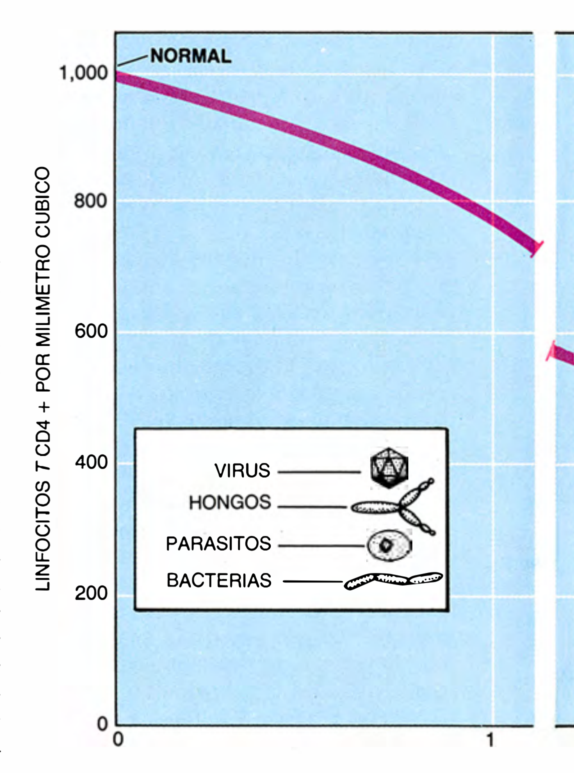
En ciertos organismos, y presumiblemente en *P. carinii*, se cree que la pentamidina impide la replicación microbiana al inhibir la síntesis de ADN, aunque no se sabe muy bien cómo lo hace. El co-trimoxazol inhibe también la síntesis de ADN [*véase la figura 4*]. El componente sulfametoxazol inhibe la actividad de una enzima, la sintasa del dihidropteroato (DHPS), que coadyuva en la producción de un derivado del ácido fólico. Este folato es esencial para la producción de nucleótidos, los bloques con los que se construye el ADN. El interés de los inhibidores de la DHPS reside en que afectan a la síntesis del ADN microbiano, pero no a la del humano. Las células humanas y las de otros mamíferos no necesitan DHPS, y de hecho no la tienen; aprovechan el folato de la dieta.

El componente trimetoprim del cotrimexazol complementa al sulfametoxazol al bloquear la actividad de una enzima relacionada, la reductasa del dihidrofolato (DHFR), que convierte al folato sintetizado por los microbios en formas que están directamente implicadas en la producción de nucleótidos. El trimetoprim entorpece, aunque muy poco, la acción de la DHFR humana.

La pentamidina y el co-trimoxazol se muestran bastante eficaces contra *P. carinii*, en particular si la terapia comienza antes de que la enfermedad haya progresado mucho. Pero tienen inconvenientes. Los dos agentes son poco eficaces en pacientes muy graves, y los dos suelen provocar efectos secundarios serios. Aproximadamente la mitad de los pacientes no toleran la primera droga prescrita, y debe buscarse una opción alternativa. Por su parte, la pentamidina intravenosa puede interesar la función renal o provocar una fuerte caída de los niveles de azúcar en la sangre. El cotrimoxazol puede producir fuertes náuseas, erupciones cutáneas, fiebre, disminución en el número de leucocitos y plaquetas e inflamación del hígado.

Muchos son los investigadores que buscan nuevos agentes que resulten menos tóxicos o más eficaces que las drogas existentes, o, en el caso de la pentamidina, más fáciles de administrar. Se encuentran en fase de ensayo clínico un número creciente de inhibidores de la DHFR y la DHPS. Entre ellos, los nuevos inhibidores de la DHFR: el trimetrexato (intravenoso) y el piritrexim (oral).

Con esperanzadores resultados, se están probando en el laboratorio la combinación de dos compuestos antimicrobianos estándar —la clindami-



2. INFECCIONES OPORTUNISTAS que se dan con frecuencia en personas infectadas con el virus de inmunodeficiencia humana (VIH), cau-

cina (que inhibe la síntesis de proteínas bacterianas) y la primaquina (una droga antimalaria)– y la combinación de trimetoprim y dapsona (inhibidor de la DHPS). Sometidos a estudios clínicos se hallan también la difluorometilornitina, o DFMO (un inhibidor de la síntesis de ADN en ciertos parásitos), y un agente provisionalmente denominado 566C80, que afecta a la producción de energía por las mitocondrias. Los investigadores analizan, asimismo, la actividad anti-*P. carinii* in vitro de miles de inhibidores de la DHPS y la DHFR.

Se trabaja en terapias que no atacan al microbio con el fin de mejorar la asistencia médica de la infección aguda. Según varios ensayos clínicos recientes, la administración precoz de glucocorticoides reduce la inflamación de los pulmones y puede aumentar la supervivencia de los pacientes gravemente enfermos. Como los afectados por la neumonía de *P. carinii* sufren carencias de sustancias tensioactivas del pulmón responsables de mantener abiertos los conductos de ventilación, en el futuro podría ensayarse una terapia basada en la inclusión de un tensioactivo artificial en el aerosol.

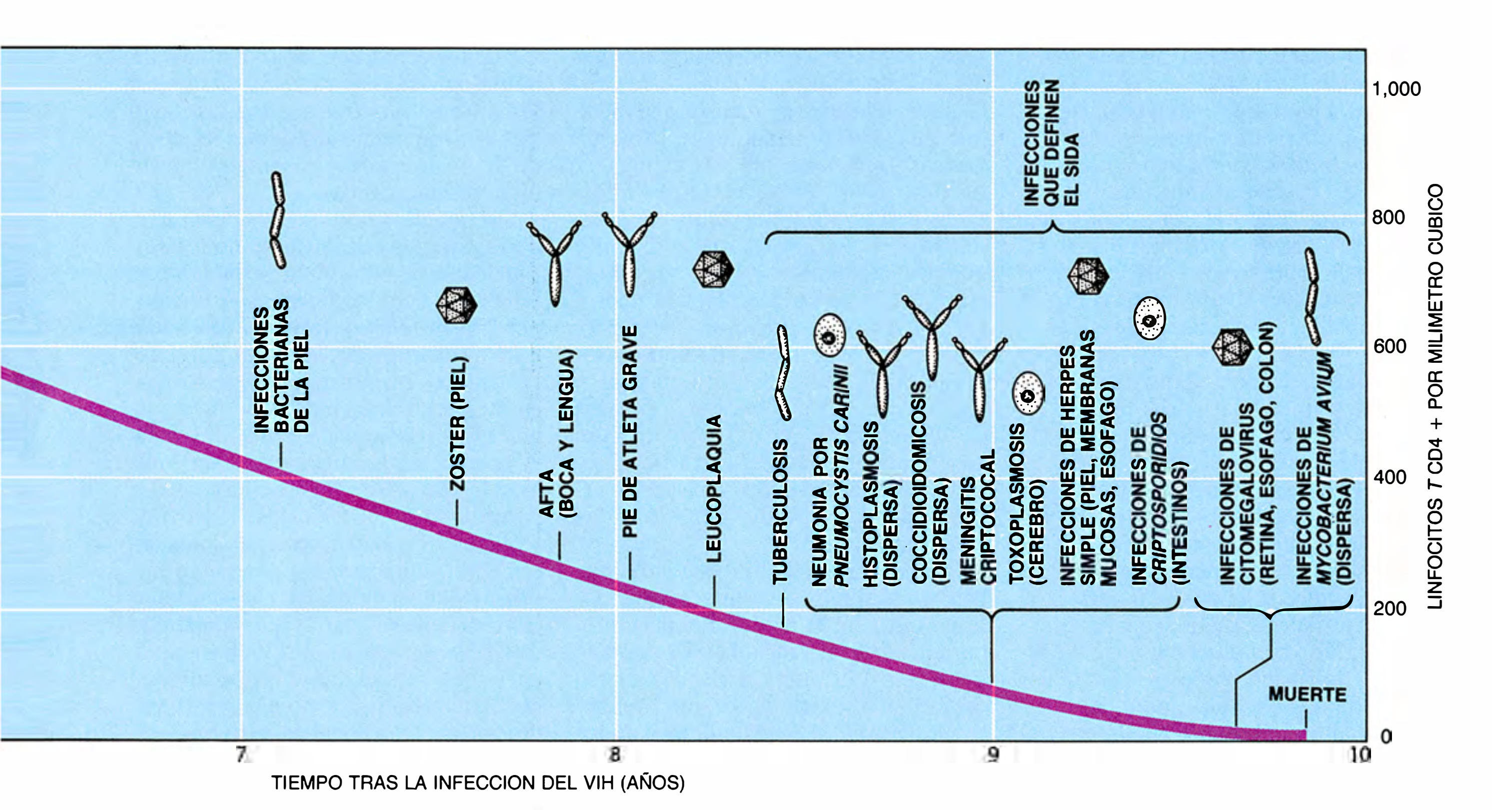
En la profilaxis primaria y secundaria, tanto la pentamidina inhalada como la dapsona y el co-trimoxazol ofrecen muy buen rendimiento. Pero se desconocen su eficacia y toxicidad relativas, y se está en su estudio. A tenor de los descubrimientos de Phair, parece que la profilaxis primaria específica para el *P. carinii* debería comenzar poco tiempo antes de que el número de células *T* CD4+ llegara a 200, o incluso antes si el paciente tiene CAS o SIDA.

El valor de la terapia preventiva secundaria se aprecia con mayor claridad cuando se analizan datos recientes. No hace mucho, aproximadamente la mitad de los pacientes que sobrevivían a un primer ataque de neumonía producida por *P. carinii* tenían una recaída en menos de un año, tomaran o no zidovudina. Actualmente, sólo el 10 o 20 por ciento de los pacientes que toman zidovudina y un profiláctico específico de *P. carinii* sufren una recaída en ese intervalo. Más aún, la esperanza de vida media en quienes no reciben una terapia preventiva específica es de sólo un año, después del primer episodio de neumonía; por contra, la supervivencia de cuantos reciben una profilaxis secundaria y zidovudina suele ser de tres años, aproximadamente.

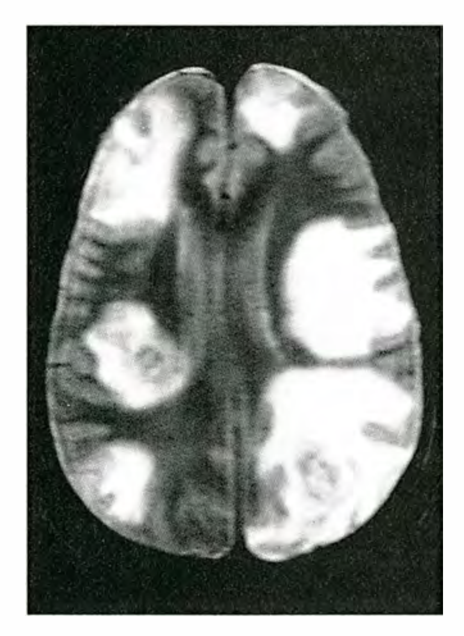
Son cifras alentadoras. Y esperamos que, de las nuevas drogas que puedan conseguirse para el tratamiento de las infecciones agudas de *P. carinii*, algunas de ellas constituyan la base de terapias preventivas efectivas, no tóxicas, accesibles y económicas.

Los progresos en el desarrollo de nuevas terapias para otras infecciones oportunistas asociadas al SIDA han ido más lentos. Es el caso, por ejemplo, de la toxoplasmosis. Esta enfermedad es causada por *Toxoplasma gondii*, parásito unicelular que vive en gatos, otros animales y también en el hombre. Puede transmitirse al hombre por contacto con las heces de gatos infectados y a través de la carne mal cocinada de otros animales infectados. Se sospecha que, en los Estados Unidos, el 20 por ciento o más de los adultos son portadores de este organismo, usualmente en el cerebro o músculos.

En el 5 al 15 por ciento de los sidosos esta infección latente se activa, normalmente en el cerebro. La rápida división de los parásitos provoca una respuesta inflamatoria que destruye las células cerebrales, causando anomalías funcionales locales, que se traducen, por ejemplo, en sensación de debilidad o abatimiento en un lado del cuerpo.



sante del SIDA. Su aparición es normalmente secuencial y está relacionada con la concentración en la sangre de un tipo de células, los linfocitos *T* CD4+. El número de células, que disminuye con el tiempo, refleja el grado de deterioro inmunitario causado por el virus de inmunodeficiencia. La lista de infecciones está realizada sobre los datos recogidos en parte por Suzanne M. Crowe, del hospital australiano de Fairfield en Melbourne.





3. REPRESENTACION VISUAL de ciertas infecciones. Así ocurre con la toxoplasmosis del cerebro (*izquierda*): provoca convulsiones y produce lesiones discretas que dibujan áreas claras en imágenes de resonancia magnética. En fotografías de retinas dañadas por citomegalovirus (*derecha*), las áreas amarillentas denotan tejidos muertos; las manchas rojas brillantes (con vasos sanguíneos obstruidos) denuncian hemorragias en la retina. (El área negra se ha separado de la parte posterior del ojo.)

De momento, la única terapia efectiva contra la toxoplasmosis es una combinación de pirimetamina (un inhibidor de la DHFR) y sulfadiazina (un inhibidor de la DHPS), que puede administrarse por vía oral. La mayoría de los pacientes mejoran en una o tres semanas, a medida que se detiene el desarrollo del microorganismo y remite la hinchazón del cerebro. Lamentablemente, la mayor parte del daño cerebral es irreversible. Y, como acontece con la neumonía causada por *P. carinii*, se necesita una profilaxis secundaria, ya que las drogas recetadas para la toxoplasmosis suprimen la infección pero no la curan. La terapia repite muchos de los mismos efectos secundarios que el co-trimoxazol. De hecho, aproximadamente el 30 por ciento de los pacientes son incapaces de tolerar un tratamiento continuado.

Parece que existen, por fortuna, algunas posibles alternativas. En un ensayo clínico (en espera aún de repetición), se ha observado que la combinación de la pirimetamina y el antibacteriano clindamicina funciona casi tan bien como la combinación estándar de pirimetamina y sulfadiacina. Además, la búsqueda de otras drogas antimicrobianas mediante ensayos de actividad anti-*T. gondii* in vitro o en ratones, ha permitido identificar algunos tratamientos potenciales. Citemos, entre ellos, la clindamicina y análogos de la tetraciclina, así como ciertos inhibidores de la DHFR y la DHPS. Sin embargo, ninguno de esos compuestos ha sido todavía bien estudiado en personas.

Siguiendo una estrategia distinta, algunos investigadores aprovechan el hecho de que *T. gondii* sólo pueda sobrevivir en células y macrófagos no activados. En los individuos normales, los macrófagos ingieren a los microbios invasores y, tras ser activados por el interferón gamma y otras citocinas secretadas por las celulas *T*, los destruyen. En los pacientes infectados con el VIH, las células *T* están dañadas y el aporte de interferón gamma es mínimo, por lo que se ingiere, pero no se destruye, el microbio. Se estudia, por tanto, el efecto del interferón gamma añadido al tratamiento estándar de pirimetamina y sulfadiacina. En animales y cultivos celulares, este tipo de aproximación ha incrementado la eficacia de la terapia basada en las dos drogas. Se espera que muy pronto comiencen los ensayos clínicos.

Por lo común habrá que administrar pirimetamina y sulfadiacina durante el resto de la vida del paciente, para prevenir las recaídas. Es cuestionable, no obstante, si debe seguirse de forma rutinaria la terapia preventiva primaria. Muchos médicos de los Estados Unidos son reacios a administrar drogas potencialmente tóxicas a todos los infectados con el VIH; su argumento es que, sin tratamiento, sólo una quinta parte o menos de esos individuos padecerán toxoplasmosis. En Francia, sin embargo, donde la toxoplasmosis es mucho más común, se recomienda frecuentemente la profilaxis primaria. Los estudios para valorar los posibles beneficios de dicha terapia han comenzado ya.

En contraste con la toxoplasmosis, las principales infecciones bacterianas que sufren los sidosos adultos —las causadas por organismos del complejo *Mycobacterium avium*— rara vez interesan el cerebro. Afectan, sin embargo, a otros muchos órganos, principalmente a los pulmones, hígado, bazo, nódulos linfáticos, médula ósea, intestinos y sangre. Lo normal es que la infección esté diseminada por todo el cuerpo.

Estas bacterias, relacionadas con el agente responsable de la tuberculosis (*M. tuberculosis*), se hallan por doquier: en el polvo, suelo y productos avícolas y lácteos. Al parecer, se introducen en el cuerpo a través del polvo o gotitas que se inhalan del medio y por el agua y la comida. A pesar de su ubicuidad, rara vez producen una infección activa, incluso en individuos inmunoafectados por causas distintas del virus VIH.

Casi el 50 por ciento de los pacientes con SIDA, no obstante, tendrán una infección generalizada cuando mueran. Las micobacterias despiertan una fuerte respuesta inmune mediada por células en los individuos inmunológicamente sanos, pero no en los sidosos. Aunque sus tejidos infectados contienen cantidades ingentes de *M. avium*, sólo presentan una mínima inflamación.

La proliferación de micobacterias pudiera ser la responsable de los síntomas que a menudo acompañan a la infección, como la fiebre, sudoración, pérdida de peso y fatiga. Pero nadie ha conseguido demostrarlo de manera tajante. Lo normal es que los pacientes estén infectados con otros organismos (como los citomegalovirus y el propio VIH) que pueden ser también los causantes de los síntomas. La pérdida de glóbulos rojos, leucocitos y plaquetas que vemos en algunos casos con la infección de *M. avium* podría obedecer también a la acumulación de micobacterias en la médula ósea. Se dan casos, sin embargo, de pacientes con grandes cantidades de micobacterias por todo el cuerpo que muestran escasos signos, si alguno, de disfunción orgánica específica.

Lo deseable, obviamente, sería poder contar con un tratamiento efectivo para los pacientes sintomáticos. No vale para ello la isoniacida, base

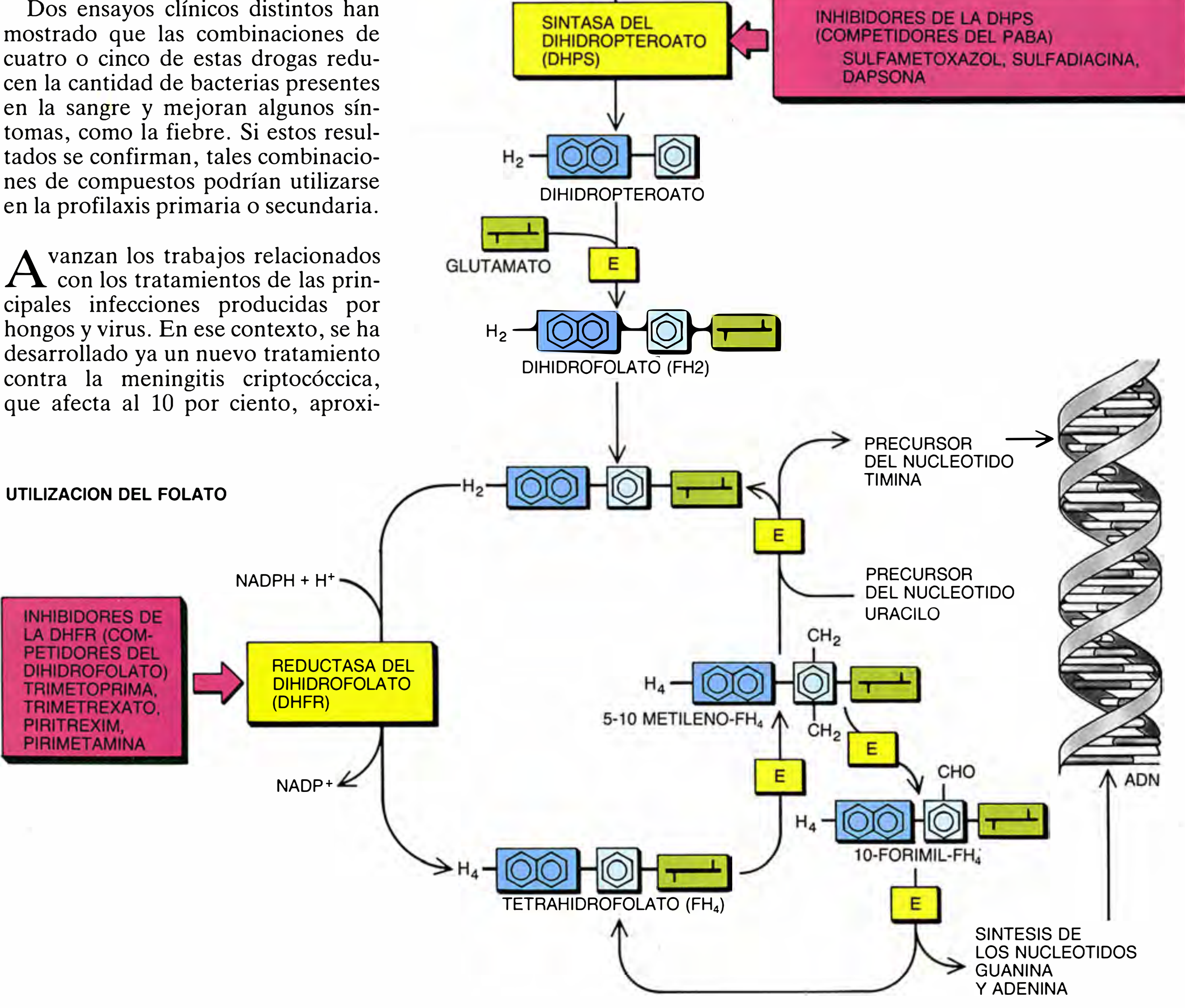
de la terapia contra la tuberculosis, que se muestra incapaz de controlar la proliferación de *M. avium*. Los investigadores han ensayado, en consecuencia, con toda una batería de agentes distintos, algunos de los cuales, por sí solos o en combinación, limitan el crecimiento de tales bacterias en células cultivadas o ratones inmunodeficientes. De los compuestos que a menudo se recetan contra la tuberculosis, los clasificados como aminoglucósidos (así, la estreptomicina y amicacinas) y las drogas del grupo de las rifamicinas y el etambutol han demostrado cierta eficacia contra *M. avium*. Lo mismo ocurre con otros antimicrobianos, como la ciprofloxacina, el imipenem y la clofacimina.

Dos ensayos clínicos distintos han mostrado que las combinaciones de cuatro o cinco de estas drogas reducen la cantidad de bacterias presentes en la sangre y mejoran algunos síntomas, como la fiebre. Si estos resultados se confirman, tales combinaciones de compuestos podrían utilizarse en la profilaxis primaria o secundaria.

Avanzan los trabajos relacionados con los tratamientos de las principales infecciones producidas por hongos y virus. En ese contexto, se ha desarrollado ya un nuevo tratamiento contra la meningitis criptocóccica, que afecta al 10 por ciento, aproximadamente, de los pacientes con SIDA en los Estados Unidos, y están en marcha nuevas terapias experimentales.

El organismo responsable de la meningitis criptocóccica, la levadura *Cryptococcus neoformans*, se parece mucho al hongo que produce el afta, con una diferencia importante: *C. neoformans* se propaga más fácilmente fuera de la piel y de las membranas mucosas. Se halla rodeado por una escurridiza cubierta externa que le protege de los macrófagos y de otras células inmunitarias, como los granulocitos. La cubierta le ayuda a resistir, una vez ingerido, el ataque de enzimas presentes en tales células. Se desconoce, no obstante, de qué manera *C. neoformans* produce la enfermedad. Hasta el momento nadie ha identificado ningún producto tóxico en este organismo.

Se cree que la infección inicial comienza en los pulmones, donde probablemente permanece confinado en



4. MUCHAS DROGAS utilizadas contra la neumonía producida por *P. carinii* o la toxoplasmosis (*rojo*) impiden la actividad de las formas microbianas de la enzima sintasa del dihidropteroato (DHPS) o la reductasa del dihidrofolato (DHFR). Estas enzimas participan en la producción (*arriba*) y utilización (*abajo*) de folatos (derivados del ácido fólico) para la síntesis de nucleótidos, bloques con los que se construye el ADN. Los inhibidores de la DHPS se parecen al ácido paraminobenzoico (PABA), una subunidad del principal producto final de la síntesis del folato, el dihidrofolato. Al unirse a la DHPS, los medicamentos impiden que la enzima interactúe con el propio PABA y, por ende, la unión de dicho ácido paraminobenzoico con la dihidropteridina, otra subunidad del dihidrofolato. Los inhibidores de la DHFR son análogos del dihidrofolato. Al ligarse competitivamente con la enzima reductasa del hidrofolato, impiden que el verdadero folato se convierta en una forma capaz a su vez de ser convertida en todas las variedades directamente necesarias para la síntesis de los nucleótidos. La letra E que aparece en los recuadros representa otras enzimas.

el caso de los individuos con defensas inmunológicas normales. En los pacientes inmunodeficientes, sin embargo, el hongo invade el torrente sanguíneo, alojándose por último en las meninges, membranas que recubren el cerebro. La invasión, letal en potencia, de las meninges se autoanuncia con fuertes dolores de cabeza, rigidez de cuello y, a veces, fiebre.

En los últimos 30 años, y hasta muy recientemente, la anfotericina B era la única posibilidad de tratamiento. Esta droga se une al ergosterol, una sustancia parecida al colesterol, presente en la membrana celular del hongo. La unión daña la membrana, produciendo la descarga fatal del contenido interno del organismo.

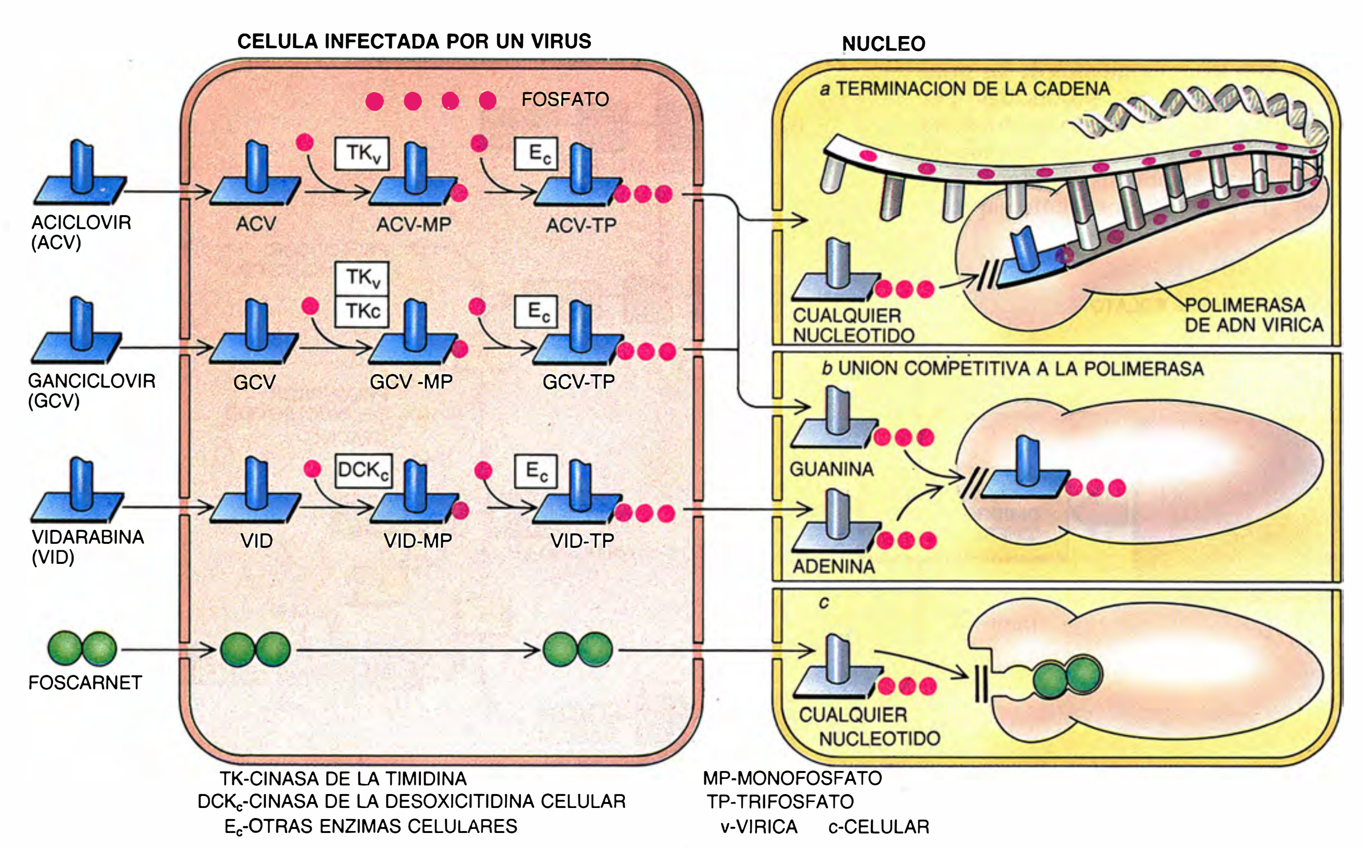
Desgraciadamente, la droga, que debe administrarse por vía intravenosa, produce daños en los glóbulos rojos humanos (causando anemia) y puede afectar a los riñones. Además, la formulación que se precisa para que el compuesto activo pueda ser introducido por vía intravenosa induce con frecuencia síntomas similares a la gripe, como escalofríos y fiebres altas. Incluso con un tratamiento continuado, el 20 por ciento de los sidosos con meningitis criptocóccica morirá por culpa de la misma.

En teoría, la anfotericina B puede realmente erradicar las infecciones fúngicas, no sólo frenar su desarrollo. Sin embargo, las altas dosis que se necesitan para ello probablemente matarían al paciente también. Como las dosis que se suministran son supresoras, no curativas, los pacientes que sobreviven a la enfermedad deben, otra vez, recibir una terapia preventiva prolongada. Ello requiere tratamientos intravenosos una o dos veces por semana.

Sin duda, una preparación alternativa que pudiese tomarse por vía oral sería un avance fundamental en la terapia preventiva. Los agentes más prometedores en los ensayos clínicos pertenecen al grupo de los imidazoles, compuestos antifúngicos que inhiben la síntesis de ergosterol. Dos de estos agentes, itraconazol y fluconazol, revisten particular interés. Los primeros ensayos clínicos con itraconazol indican que puede ser casi tan efectivo como la anfotericina B, y menos tóxico. Los análisis de un extenso estudio reciente sugieren que el fluconazol poseería la eficacia de la anfotericina B; está ya autorizado en muchos países, incluidos los Estados Unidos. Hay en marcha otra investigación destinada a evaluar las posibilidades de este compuesto como terapia preventiva.

La medicación oral es también muy necesaria para la prevención y tratamiento de las infecciones por citomegalovirus. Más de la mitad de los norteamericanos en edad adulta están infectados, habiendo recibido el virus por contacto sexual o por convivencia en sitios cerrados con otras personas, particularmente donde las condiciones higiénicas son malas.

En los adolescentes y adultos sanos, la infección por citomegalovirus produce síntomas parecidos a la mononucleosis, aunque la mayoría de los afectados ignoran que han adquirido



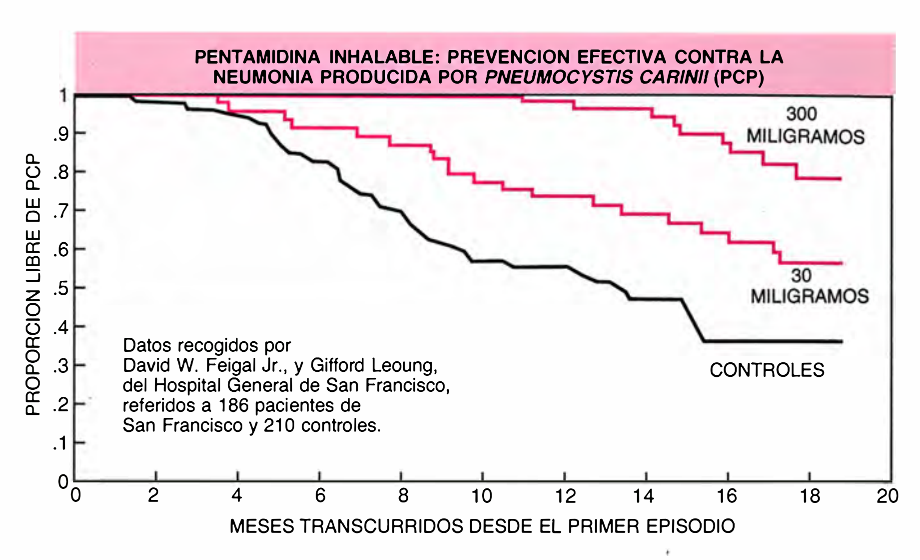
5. CUATRO MEDICAMENTOS ANTIHERPES (*izquierda, al principio*) **se oponen a la actividad de la polimerasa de ADN vírica, enzima que construye ADN a partir de nucleótidos. Estas enzimas se encargan de eliminar dos de los tres grupos fosfatos con que cuenta un nucleótido, y conectan lo que queda del mismo con un grupo OH del nucleótido engarzado previamente. El aciclovir, el ganciclovir y la vidarabina son fosforilados por enzimas en las células infectadas por virus, tras lo cual aparentan ser nucleótidos trifosfatados normales (*recuadro de la izquierda*); el foscarnet se parece al grupo difosfato que la polimerasa elimina normalmente de los nucleótidos. El aciclovir trifosfatado puede detener la síntesis de ADN (*recuadro de la derecha*), por terminación de la cadena (*a*): si se agrega a una cadena de ácido desoxirribonucleico en formación, suspende el desarrollo de la misma porque carece del OH necesario para la adición del siguiente nucleótido. El aciclovir trifosfatado —igual que el ganciclovir y la vidarabina fosforilados— puede también trabarse fuertemente con la polimerasa, bloqueando el sitio donde se unen los nucleótidos, e impidiendo así que la enzima actúe sobre los verdaderos nucleótidos (*b*). El foscarnet bloquea, a su vez, el sitio de unión de los nucleótidos (*c*). (Ian Worpole.)**

el virus. Como sucede con todos los virus herpes, tras la infección inicial sigue, en los individuos sanos, el establecimiento de un estado quiescente, durante el cual el microorganismo no causa ningún mal. En la sangre y otros tejidos suelen aparecer grandes cantidades del patógeno.

El daño funcional, sin embargo, suele limitarse a los ojos y al tracto gastrointestinal. En el 7 por ciento de los sidosos, el virus invade los bastoncillos y conos de la retina, células que captan la luz y el color. La infección termina matando las células afectadas, con daño irreversible de la visión. Además, las zonas muertas de la retina se desgarran y se separan del ojo. Ello origina hemorragias que pueden provocar una repentina y total ceguera.

En otro 5 por ciento de los sidosos, el virus arraiga en el aparato digestivo, en cualquier parte de la boca al recto, aunque lo normal es que afecte al esófago o al colon. Las úlceras del esófago convierten la deglución en proceso doloroso; pueden producir también dolores de pecho.

En el colon, originan a menudo dolores abdominales y diarreas. Las hemorragias incontrolables que se producen en los tejidos dañados del esófago y colon acaban, a veces, en desenlace fatal.



Las drogas que se utilizan con profusión para tratar las enfermedades producidas por citomegalovirus son tóxicas y deben administrarse por vía intravenosa. Una de ellas, el ganciclovir, está autorizada en los Estados Unidos y en otros países. Se espera que la otra, el foscarnet, en fase todavía de experimentación, recibirá pronto la autorización. Ambos compuestos inhiben selectivamente la polimerasa de ADN vírica, enzima esencial para la construcción del ADN nuevo a partir de los nucleótidos, e imprescindible, por tanto, para la replicación del virus. En otros aspectos, sin embargo, las dos drogas difieren bastante.

El ganciclovir, que actúa contra muchos virus herpes, es un análogo del nucleósido guanosina (un precursor nucleotídico); fúndase la actividad antivírica en la capacidad de la droga para remedar la guanosina. Las células infectadas por el virus añaden fosfato al compuesto como si la droga fuese guanosina, formando trifosfato de ganciclovir, un sucedáneo de nucleótido. Este impostor se une competitivamente a la polimerasa de ADN vírica, inactivándola, ya que bloquea la posibilidad de tomar nucleótidos verdaderos. Desgraciadamente, el ganciclovir se fosforila algo también en las células sin infectar, entorpeciendo la actividad de la polimerasa de ADN humana.

La otra droga, el foscarnet, es un análogo de los dos fosfatos que la polimerasa de ADN escinde de los nucleótidos trifosfatados antes de colocar los nucleótidos en la cadena de ADN naciente. También este análogo es tomado por la polimerasa de ADN vírica, bloqueando la posibilidad de que ésta capte nuevos nucleótidos. El foscarnet actúa contra la polimerasa de ADN de todos los virus herpes que infectan a los humanos y contra la polimerasa de ADN (retrotranscriptasa) del propio VIH; no afecta, sin embargo, a la enzima humana.

Al oponerse a la replicación vírica, ambas drogas detienen la progresión de la enfermedad de la retina causada por los citomegalovirus; detienen también, así parece, la propagación de la infección a otros sitios. Mas, como la droga no mata al virus, debe tomarse continuamente. A modo de medida preventiva, el ganciclovir y el foscarnet deben administrarse una vez o más al día; ello requiere la implantación de un catéter en el pecho, lo que, si bien posibilita la terapia, expone al paciente a infecciones en el tejido que rodea al aparato.

Hay otro inconveniente: el ganciclovir resulta tóxico para los leucocitos, los granulocitos en particular. En el 10 o 20 por ciento de los pacientes, la caída de granulocitos adquiere tal proporción que el tratamiento debe ser discontinuo (ya que un bajo número de granulocitos torna a los pacientes vulnerables a infecciones bacterianas que pueden ser fatales). El foscarnet puede causar disfunciones renales reversibles y trastornos metabólicos y neurológicos también reversibles.

Se ha visto que, en algún caso, los citomegalovirus devienen resistentes al ganciclovir. Aunque el problema no es general todavía, varios pacientes tratados dejaron en cierto momento de responder a dicha droga. Afortunadamente, en pruebas de laboratorio y ensayos clínicos preliminares se ha comprobado que las estirpes resistentes al ganciclovir son sensibles al foscarnet. Pero los investigadores han conseguido en el laboratorio mutantes de citomegalovirus que son también resistentes al foscarnet. Ninguna de estas variantes se ha detectado aún en ningún paciente; quizá sea cuestión de tiempo.

El fenómeno de la resistencia y los problemas planteados por las administraciones intravenosas evidencian la urgente necesidad de terapias alternativas. Todos esperamos que en un futuro próximo se desarrollen derivados del ganciclovir de administración oral. Una de estas drogas, la HOE-602 (así llamada por su fabricante, Hoechst) se está ensayando clínicamente en Alemania. La sustancia, fácilmente absorbible por el tubo digestivo, se convierte en el cuerpo en ganciclovir.

Otro análogo de nucleósido, el aciclovir, puede resultar también útil. Igual que el ganciclovir, inhibe la polimerasa de ADN vírica. Reside su atractivo en su menor toxicidad que el ganciclovir. Puede ingerirse por vía oral. Pero también es mucho menos activo contra los citomeglovirus que el ganciclovir. No obstante, en dosis altas puede suprimir la activación de las infecciones de citomegalovirus en receptores de transplantes de órganos, y lo mismo en sidosos.

Continúa la búsqueda de drogas que, menos tóxicas que el ganciclovir y el foscarnet, posean su eficacia, si no superior, a la hora de inhibir la polimerasa de ADN vírica. Al mismo tiempo, los investigadores se afanan por hallar productos que bloqueen otras actividades víricas, con la esperanza de que tales agentes sean eficaces contra los virus resistentes al ganciclovir y al foscarnet.

En contraste con los citomegalovirus, otros dos virus herpes importantes para el SIDA —el herpes simple tipo 1 y el tipo 2— producen infecciones recurrentes en muchos individuos inmunológicamente normales. Las afecciones más comunes causadas por estos virus son, respectivamente, herpes labial y úlceras genitales recurrentes. En el contexto de la infección del VIH estas lesiones no son locales. No tienden a desaparecer, sino que se expanden progresivamente. Como son dolorosas, pueden hacer perder el apetito, si aparecen en la boca o en el recto.

Aunque el aciclovir no es muy efectivo contra los citomegalovirus, constituye una excelente terapia para los herpes simple. Incluso en pacientes con grandes ulceraciones, éstas quedan controladas en pocas semanas. Desgraciadamente, parece que cada vez se observa una mayor resistencia de los virus herpes simple a la droga.

La mayoría de las estirpes resistentes a la droga escapan a los efectos del aciclovir porque no producen cantidades significativas de cinasa de la timidina. La versión vírica de esta enzima fosforila el aciclovir, un paso crucial para la actividad de todas las drogas análogas de nucleósidos. La cinasa vírica no es, sin embargo, imprescindible para la replicación de los virus herpes simple, que tiene maneras de compensar la falta de enzima.

Una estrategia lógica para hacer frente a las estirpes deficientes en cinasa de timidina es suministrar un análogo de nucleósido que puedan fosforilarlo enzimas humanas en las células infectadas. Existe ya la vidarabina, utilizada durante más de 10 años para tratar infecciones de herpes simple y zoster especialmente graves. Al menos en ensayos de laboratorio, se ha comprobado que muchas de las estirpes de virus herpes simple resistentes al aciclovir son sensibles a la vidarabina. Este descubrimiento sugiere que la vidarabina puede servir cuando fracasa el aciclovir, aunque debe administrarse por vía intravenosa.

Como el foscarnet no tiene que fosforilarse para ser activo, vale también; en este sentido, tanto los ensayos de laboratorio como las pruebas clínicas preliminares han sido alentadores. Pero, una vez más, comienzan ya a aparecer casos de estirpes de herpes simple resistentes al foscarnet.

Como bien ilustra el problema de las estirpes víricas resistentes a las drogas, nos enfrentamos ante un reto descomunal. Hay que conseguir tratamientos efectivos y variados para cada una de las principales infecciones oportunistas que afectan a los pacientes con SIDA, así como drogas para la profilaxis que sean fáciles de administrar, no tóxicas y económicas. De lo contrario, las infecciones y otras enfermedades asociadas con el VIH (como ciertos cánceres) que no puedan domeñarse tomarán el relevo de las que puedan ser dominadas eficazmente.

También se requieren terapias para las infecciones oportunistas menos habituales (infección del parásito criptosporidio, que puede producir diarreas), o que son importantes sólo en ciertas partes del globo. Ejemplos de éstas son la histoplasmosis y la coccidioidomicosis, infecciones fúngicas confinadas, en el primer caso, a ciertas áreas dispersas de todo el mundo, y, en el segundo, a desiertos de ambos hemisferios americanos.

Queda mucho por investigar en relación con las nuevas terapias, sin duda. Pero complace ver el creciente consenso sobre la necesidad de estudiar y desarrollar drogas contra las infecciones oportunistas asociadas con el VIH. Cada avance en esa dirección significará una notable diferencia en la vida de quien, día tras día, lucha contra los efectos directos e indirectos del mortífero virus del SIDA.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

AIDS: ETIOLOGY, DIAGNOSIS, TREATMENT AND PREVENTION. Dirigido por Vincent T. DeVita, Jr., Samuel Hellman y Steven A. Rosenberg. Segunda edición. J. B. Lippincott Co., 1988.

OPPORTUNISTIC INFECTIONS IN PATIENTS WITH THE ACQUIRED IMMUNODEFICIENCY SYNDROME. Dirigido por Gifford Leoung y John Mills. Marcel Dekker, 1989.

PULMONARY INFECTIOUS COMPLICATIONS OF HUMAN IMMUNODEFICIENCY VIRUS INFECTION. John F. Murray y John Mills en *American Review of Respiratory Disease.* Parte I, vol. 141, n.º 5, págs. 1356-1372; mayo de 1990. Parte II, vol. 141, n.º 6, págs. 1582-1598; junio de 1990.

Ciencia y sociedad

El arte, más cerca de la naturaleza

Sello distintivo de la célula viva es su capacidad de producir catalizadores químicos: las enzimas, dotadas de una especificidad y eficacia extraordinarias. Pero esa habilidad ha dejado de serles exclusiva. Bioquímicos del departamento de ciencias de la salud de la Universidad de Colorado en Denver han conseguido saltarse millones de años de evolución al diseñar y producir la primera enzima totalmente sintética.

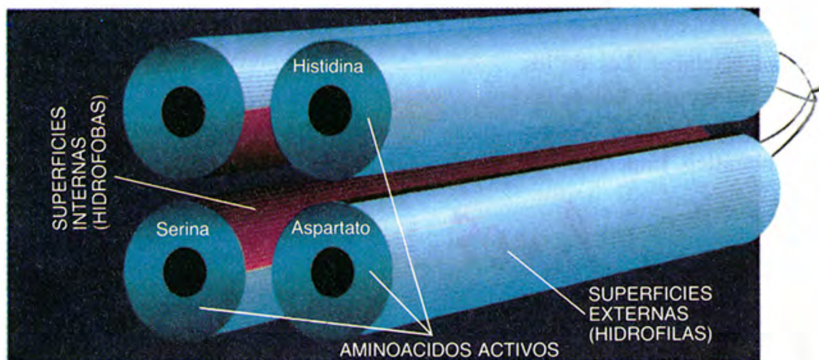
Merced a su conformación, esas proteínas mantienen en su lugar a las moléculas que participan en una reacción química, y así ésta se acelera. Karl W. Hahn, Wieslaw A. Klis y John M. Stewart decidieron crear una molécula que imitase el proceder de la quimotripsina, enzima que fragmenta las proteínas por determinados puntos químicos.

Los investigadores sabían de antemano qué aminoácidos de la quimotripsina eran los implicados en su función enzimática. Con un programa de ordenador que modela morfologías de proteínas, Stewart y sus colegas diseñaron una molécula que mantuviera los aminoácidos en cuestión en la posición adecuada para que realizaran su labor.

La molécula creada consta de cuatro cilindros proteicos paralelos, que se unen por un extremo. En la punta opuesta, el extremo de trabajo, se hallan los aminoácidos que confieren la actividad enzimática. Los cilindros, así se han preparado, muestran atracción mutua suficiente para aportar el espacio requerido por tales aminoácidos y para ofrecerle un hueco a la proteína efectora (la diana o blanco) antes de someterse a la fragmentación.

Acabado el modelo, los investigadores procedieron a la síntesis de la molécula. Se comportó ésta de acuerdo con lo previsto: a imitación de la quimotripsina, sólo atacó las moléculas que corta ésta. Cierto es que no lo hace con idéntica rapidez, pero la quimohelizima-1 (ése es su nombre) le saca de ventaja el soportar mejor altas temperaturas.

No se le adivinan aplicaciones prácticas a la quimohelizima-1, pero podría allanar el camino para la creación de otras enzimas artificiales. El equipo de Stewart está trabajando sobre varias ideas; una de ellas, sintetizar una enzima contra el envenenamiento por gas nervioso o pesticidas. Confía también en fijar enzimas artificiales en una matriz sólida. Si esto se lograse, dice, las enzimas sintéticas, capaces entre otras cosas de resistir altas temperaturas, constituirían una nueva generación de catalizadores.



1. QUIMOHELIZIMA-1, molécula creada por John M. Stewart y colaboradores, de la Universidad de Colorado en Denver. Imita la acción de la quimotripsina.

Tolerarse a sí mismo

Si el sistema inmune no hiciera habitualmente la vista gorda ante los tejidos del cuerpo, nadie viviría más allá de la infancia. Por fortuna, las condiciones propicias para que el sistema inmune ataque al cuerpo —esclerosis múltiple, lupus eritematoso y otras enfermedades autoinmunes— constituyen la excepción. Pero el problema de cómo el sistema inmune aprende a reconocer y tolerar los tejidos propios, la "identidad corporal", sigue siendo el misterio central de la inmunología.

Los expertos en la materia han comenzado a hilvanar, con avances de aquí y allí, una solución parcial que confirma el aforismo de que la experiencia es el mejor maestro. Dos mecanismos, por lo menos, se hallan involucrados en la enseñanza de la tolerancia y en ambos se expone el sistema inmune a la substancias "propias". La naturaleza del primero, la deleción o supresión clonal, es todavía objeto de investigación, décadas después de su aceptación en la comunidad científica. La anergia clonal, denominación del segundo mecanismo, comienza a asentarse con firmeza, a los dos años escasos de su hipótesis.

La tolerancia inmunológica de los tejidos propios depende, en buena medida, de la actividad de los glóbulos blancos de la sangre llamados linfocitos *T*. Las células *T* no atacan de forma directa ni virus ni bacterias, pero reconocen y matan las células infectadas o portadoras de anomalías. Las moléculas receptoras, de las células *T*, se traban a los complejos de antígenos, de las superficies de otras células. Cada célula *T* está genéticamente programada para engarzarse en un solo tipo de antígeno.

La explicación largo tiempo dominante de la tolerancia fúndase en la deleción clonal, según la cual las células inmunes autorreactivas se eliminan antes de que dañen al cuerpo. En fases precoces de la vida, el sistema inmune produce un reportorio de células *T* capacitadas para salir al paso de todos los antígenos posibles, autoantígenos incluidos. Ahora bien, mientras esos linfocitos maduran en el timo, se encuentran expuestos a una amplia gama de autoantígenos que les ofrecen distintas células que se mueven por la glándula. Por razones que desconocemos, los linfocitos *T* inmaduros que "pican" y se unen a los autoantígenos presentados mueren. Y, en efecto, el sistema inmune deviene tolerante de los autoantígenos al perder su capacidad de reconocerlos.

El mecanismo de deleción clonal se apoya en una manifiesta paradoja, señala Philippa Marrack, del Instituto Howard Hughes en un artículo reciente sobre la situación actual de la inmunotolerancia aparecido en *Science*. El mecanismo acaba con los células *T* que exhiben su poder de descubrir los antígenos. Esos linfocitos podrían responder ante el envite de

los antígenos, a lo largo de su vida, de un forma dispar. El vigoroso enlace con los antígenos, sostiene ella, podría estimular tanto a las células *T* que les causara la muerte.

Aunque los investigadores aceptan que la deleción clonal sea el principal mecanismo de aprendizaje que posee el sistema inmune para despreciar los autoantígenos, hay nuevos datos que revelan la intervención de algo más. A mediados de la década de los ochenta, Mark K. Jenkins, ahora en la Universidad de Minnesota, y Ronald H. Schwartz, del Instituto Nacional de la Alergia y las Enfermedades Infecciosas, experimentaban con clones cultivados, o grupos emparentados, de linfocitos *T*. Advirtieron entonces que, bajo determinadas circunstancias, la exposición a los antígenos no desencadenaba la acción de las células *T*; la verdad es que semejante exposición convertía a las células en permanentemente silentes al estímulo antigénico. Dicho de otra manera: la señal de intervención se había convertido en señal de inmovilización. Una paradoja.

Tras estudiar más a fondo el fenómeno, Jenkins, Schwartz y sus colegas publicaron una descripción sobre la posible desactivación de los linfocitos *T* por estímulos antigénicos. En su opinión, la movilización de la célula sólo se producía si recibía, a la vez, dos estímulos específicos. Los receptores linfocíticos, evidentemente, tenían que reconocer los antígenos de la célula efectora, pero el linfocito debía recibir otra señal también; señal hasta ahora desconocida (un disparador químico tal vez, quizás una segunda proteína que interactuara con otro receptor del linfocito).

La aportación teórica del modelo, acota Schwartz, fue que "no era un comportamiento neutral tentarle las cosquillas al receptor". Si la célula *T* se limitaba a unirse al antígeno, perdía su capacidad de producir interleucina-2, sustancia imprescindible para la proliferación de células *T* [véase Interleucina-2, de Kendall A. Smith; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1990]. No moriría el linfocito, pero no volvería ya a intervenir ante un antígeno que le saliera al paso.

Este modelo de anergia clonal, así se le llamó, se apoyaba en cultivos celulares, hemos dicho. Por eso mismo, muchos inmunólogos se mostraron en un comienzo reacios a concederle valor en el desarrollo de la inmutolerancia. Pero nuevos estudios han aportado pruebas sólidas de que la anergia clonal ocurre en los animales.

El año pasado, Hans-Georg Rammensee, Ruth Kroschewski y Bernard Frangoulis, del Instituto Max Planck de Biología en Tubinga, y Fred Ramsdell, Tracy Lantz y B. J. Fowlkes, del Instituto Nacional de la Alergia y las Enfermedades Infecciosas, publicaron artículos en los que demostraban que había animales con tolerancia a un antígeno específico, portadores de células *T* insensibles. Además, igual que las células cultivadas de Jenkins y Schwartz, los linfocitos *T* naturalmente anergizados no producían, que se viera, interleucina-2.

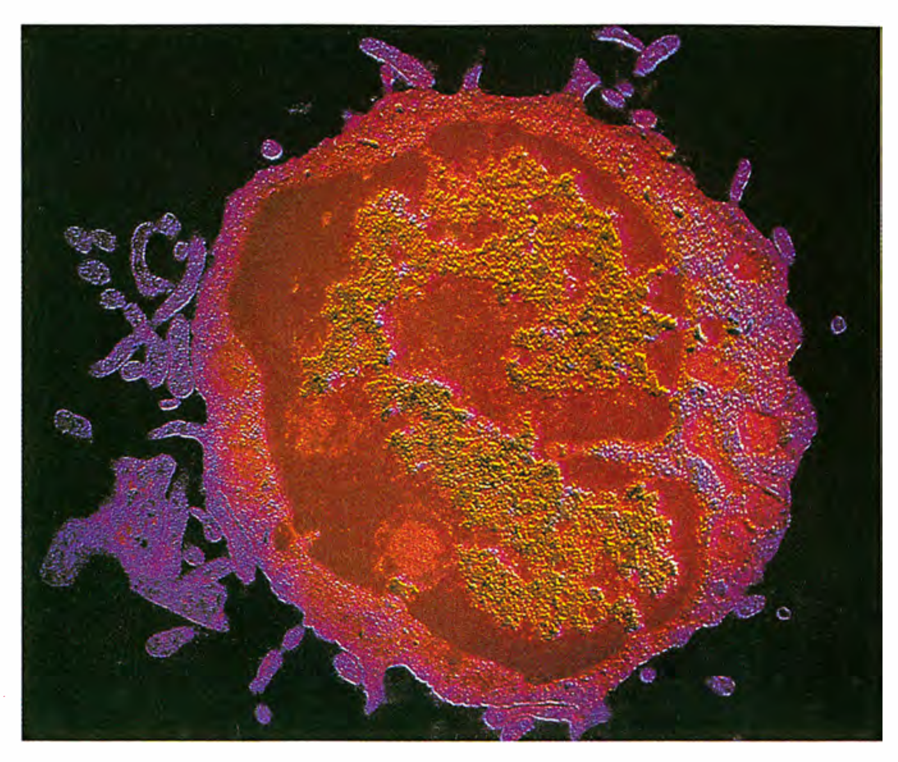
Hace cuatro meses, en junio, apareció en *Nature* uno de los informes más recientes e intrigantes sobre la anergia natural. Mediante ingeniería genética, Marcia A. Blackman, Marrack y sus colegas, del Centro Nacional Judío de Inmunología y Medicina Respiratoria, crearon ratones en los que la inmensa mayoría de células *T* presentaban receptores constituidos por la misma proteína de cadena beta. (Las cadenas alfa y beta de los receptoras trabajan juntas en el reconocimiento del antígeno.) En teoría, pues, todos los linfocitos *T* de los ratones transgénicos deberían haberse mostrado sensibles a la presencia de un determinado antígeno.

En ratones transgénicos que expresaban el antígeno de forma natural, Blackman halló pruebas de que estaban eliminándose algunas células autorreactivas. Un número notable de las supervivientes eran anérgicas, es decir, insensibles a cualquier antígeno. Los linfocitos *T* restantes, aunque no eran anérgicos en puridad, no parecían poder reaccionar al estímulo del antígeno debido a variaciones en sus cadenas alfa.

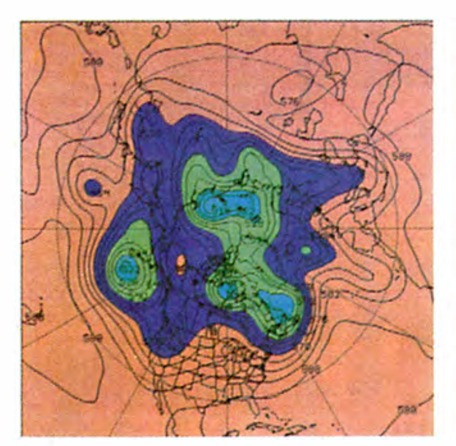
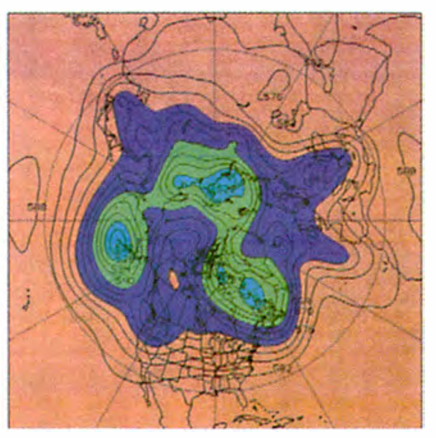
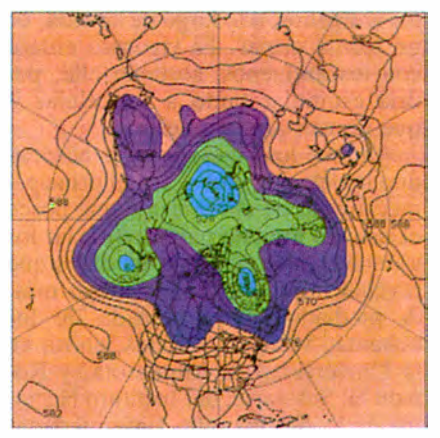
Aunque confiesa que la idea no se ha sometido todavía a contrastación, Blackman opina que "si la cadena beta posee sólo débil afinidad por un antígeno, entonces la cadena alfa podría adquirir importancia a la hora de modificar la afinidad y alterar el destino de la célula". Las células con fuerte afinidad podrían suprimirse y las que presentaran menos escapar del timo y convertirse en anérgidas. Las células dotadas de poca o ninguna afinidad sobrevivirían sin cambios.

La ola creciente de resultados experimentales ha traído a los investigadores el convencimiento del carácter natural de la anergia. Lo que ahora se discute es la cuantía de inmunotolerancia que produce. La anergia podría tener su interés en la creación de tolerancia a los autoantígenos que nunca arriban al timo o servir de poco más que de sostén para la deleción clonal.

La existencia de la anergia clonal constituye una buena noticia para los médicos que han de abordar el problema del rechazo en los trasplantes



2. *MICROGRAFIA ELECTRONICA de un linfocito* T*; destinado a matar células infectadas, puede provocar enfermedades autoinmunes. Foto:* CNRI-*Science Photo Library.*

3. COMPARACION de distintos mapas de vientos. El de la izquierda corresponde al primero de junio de 1990. El del centro fue realizado cuatro días antes por el Servicio Meteorológico Nacional con un 0,78 de correlación; el de la derecha, nueve días antes con un 0,36 de correlación.

de órganos. Como señala Schwartz, el trabajo sobre la anergia clonal sugiere que incluso el sistema inmune maduro puede aprender a aceptar tejidos extraños cual si fueran propios. Pero la corroboración de la existencia de más de un mecanismo de tolerancia en el cuerpo no hace más que ahondar el misterio de las enfermedades autoinmunes. ¿Cómo se las ingenian las células autorreactivas para evadir ambos mecanismos? "La pregunta no tiene fácil respuesta", se lamenta Schwartz.

La mariposa de Lorenz

Los ordenadores de hace 35 años no podían ofrecer sus modelos numéricos del tiempo atmosférico con una antelación superior a tres días, so pena de perderse en la fantasía científica. Hoy, la mayor precisión de los datos, el refinamiento de los modelos atmosféricos y la celerísima velocidad de los ordenadores permiten extender el margen de fiabilidad de los pronósticos hasta seis días, en promedio.

Gracias a ese avance se han salvado vidas y se ha ahorrado dinero. Pero cada nueva extensión del margen se consigue a un precio más alto. La razón es sencilla: el tiempo atmosférico es un sistema no-lineal, caótico; por consiguiente, cualquier leve inexactitud en los datos de partida se convierte, cual bola de nieve, en un abultado error de predicción.

Los meteorólogos han decidido buscar la forma de aprovechar mejor los datos en bruto que tienen ante sí. Una línea prometedora es la que recurre a la matemática para actualizar los modelos. "La tarea nos llevará año y medio de trabajo", afirma Michael Navon, director de informatización del tiempo en la Universidad estatal de Florida en Tallahassee. "Ello nos permitirá, sigue, dilatar el intervalo de pronóstico de medio día a seis."

El escollo contra el que se estrellan los meteorólogos es una "mariposa" imaginaria. En los años sesenta, Edward N. Lorenz, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, argumentó que el leve aleteo de la mariposa podría desencadenar huracanes debido a la extrema sensibilidad de los sistemas caóticos a las condiciones iniciales. Puesto que los modelos numéricos no pueden dar cuenta de semejante desviación mínima, la antelación con que puedan predecir el tiempo tendrá un límite.

La incapacidad de conocer con exactitud las condiciones actuales indujo a Lorenz a acotar el sistema de pronóstico en dos semanas, parecer que todavía respaldan la mayoría de meteorólogos. Para intervalos mayores, cualquier pronóstico deberá caer por debajo de una correlación de 0,6 con la realidad, el mínimo que se considera válido. Los pronósticos de más largas pretensiones habrán de recurrir, por ende, a las estadísticas estacionales, que se tornan inútiles cuando son precisas —en enero nevará en los Pirineos— e imprecisas cuando resultarían más valiosas —cuándo se formarán huracanes—.

Con todo, Lorenz dejó a los expertos en modelos numéricos mucho espacio para progresar. Pueden abordar el problema con más datos. Pueden resolverlo dividiendo su representación de la atmósfera en fracciones menores y más numerosas. Pueden crear modelos informáticos que den cuenta de otros procesos físicos, verbigracia, variación de la luz solar del día a la noche, resistencia de las montañas al viento e intercambio de calor entre los océanos y las masas de aire. Modelos más refinados que, a su vez, demandan ordenadores más rápidos.

En Estados Unidos, el Centro Meteorológico Nacional ha sustituido este año, de acuerdo con esa estrategia, su Cyber 205 por un Cray Y-MP, superordenador mucho más veloz, que permitirá crear un modelo de resolución superior. Cuando entre en pleno rendimiento se ganará la ven-

taja de medio día que le lleva el Centro Europeo de Pronóstico a Medio Plazo, con sede en Inglaterra.

Navon y sus colegas del Instituto Superior de Cálculo de la Universidad de Florida esperan quemar etapas sin ese gasto poniendo al día sus modelos conforme van trabajando. Los modelos que operan hoy sólo funcionan una o dos veces al día. Los datos recogidos entre un proceso y otro no pueden introducirse sin recalcular la última salida. "Se intentó emplear los datos acumulados en tiempo real, pero la cosa no tuvo mucho éxito", comenta Navon. "Nosotros, por contra, incorporamos datos aprovechando ciertas ventanas de tiempo."

El grupo universitario de Florida se ha inspirado en la teoría del control óptimo, desarrollada por matemáticos soviéticos y franceses en los años cincuenta y sesenta, para construir un modelo de ordenador auxiliar que va actualizando el modelo regular del tiempo atmosférico. El ordenador pone en marcha el modelo "auxiliar" y lo temporaliza desde el punto de inicialización hasta que tropieza con datos observacionales que contradicen el pronóstico del modelo regular. En ese momento, el modelo auxiliar redibuja la curva que describe la evolución del tiempo atmosférico.

Miles de millones de puntos aparecen así en curvas complejas que serpentean por las tres dimensiones del espacio y la cuarta del tiempo. El programa, que ha superado la prueba con datos simulados, se dispone a afrontar el reto con información real. Estos refinamientos llegarán paulatinamente hasta los meteorólogos locales y, a través de ellos, hasta el hombre de la calle. Claro que los modelos numéricos se crean para proyectar las pautas de precipitación de un hemisferio entero y no para satisfacer los intereses de los excursionistas o domingueros.

De cualquier modo, los pronósticos que aparecen en los noticiarios son cada vez más certeros. Los meteorólogos locales pueden pronosticar con 36 horas de adelanto y con una fiabilidad del 96 por ciento, en vez del 80 por ciento que era el promedio veinte años atrás... créase o no.

Impulso a la fusión

A los defensores de la fusión nuclear les está costando cada vez más mantener las subvenciones. Tras años de muy cara investigación, parece meta muy lejana todavía domeñar el proceso que alimenta al sol para conseguir una energía barata.

Se ha abierto, sin embargo, un portillo a la esperanza ante la posibilidad de una investigación conjunta ruso-norteamericana. Los soviéticos confían en que se reavive la asignación a los proyectos nucleares, muy mal parados desde el desastre de Chernobyl, en 1986. Para lograrlo, están propugnando compromisos internacionales para la construcción de un reactor termonuclear experimental, el ITER, en el que participaría la Unión Soviética, Estados Unidos, Japón y la Comunidad Europea.

Se han gastado ya, en los dos últimos años, 200 millones de dólares en el anteproyecto de tokomak. La máquina, de 30 metros de diámetro, emplea campos magnéticos para confinar plasmas en una cavidad en forma de toro a 150 millones de grados Celsius. Eugeni P. Velikhov, director del programa de fusión soviético, insiste en que, para ellos, es vital la prosecución del empeño.

Japoneses y europeos, por su parte, esperan que el proyecto avance bastante el año que viene. Se calcula que la fabricación de la máquina, que no producirá de suyo energía aprovechable aunque allanará el camino para obtener generadores económicos, importará unos 6000 millones de dólares. La construcción no empezaría antes de 1995.

Tampoco Estados Unidos quiere quedarse atrás. El comité asesor sobre política de fusión, adscrito al Departamento de Energía, recomienda que no se escatimen esfuerzos. Se ha avanzado en el proceso de fusión y sugiere, por tanto, que en el próximo quinquenio se doblen las subvenciones. Recomienda, asimismo, que se levante una planta piloto para 2025. Mientras tanto, el ITER, sigue el comité, constituye una ocasión única ante la que los Estados Unidos deberían volcarse y competir por el emplazamiento en su propio territorio de la máquina.

La colaboración ruso-norteamericana en el campo de la energía nuclear no se limita a ese proyecto. Soviéticos y estadounidenses se intercambian códigos informáticos y datos relativos a la seguridad de los reactores; están dispuestos a elaborar, juntos, la reconstrucción del desastre de Chernobyl.

La propia administración norteamericana parece dispuesta a vender a centros superiores soviéticos seis ordenadores Cyber 962. Sobre el ITER planea, sin embargo, una nube: hay quien prefiere dar el dinero a los proyectos de fusión por confinamiento inercial, donde se ataca el deuterio con haces de radiación.

Ciencia y empresa

Fármaco de moda

Todavía no hace mucho, la única manera de obtener hormona del crecimiento humano era extraerla penosamente de la glándula pituitaria de los cadáveres. Proteína tan preciosa se reservaba para los niños cuyos organismos eran incapaces de producirla en suficiente cuantía. Sin ella, se padecía enanismo o, en el mejor de los casos, había que conformarse con estaturas muy pequeñas. Pero la hormona extraída nunca bastaba para atender a los 10.000 niños menesterosos de la misma sólo en los EE.UU. Ni siquiera había la demandada por la investigación.

El advenimiento de la biotecnología, a principios de los años ochenta, con su promesa de producir grandes cantidades de proteínas, convirtió a la hormona del crecimiento en objetivo prioritario.

Genentech logró, en 1985, la aprobación de la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) para su hormona del crecimiento, registrada con el nombre de Protropin. Dos años después, esta empresa californiana se vio obligada a compartir la exclusividad con Eli Lilly, de Indianápolis, cuya Humatrope difiere en un aminoácido.

El fármaco ha salido, sin embargo, del ámbito de la pediatría. En julio, los periódicos comenzaban a hablar del "nuevo elixir de juventud", apoyándose en un informe del *New England Journal of Medicine*, según el cual la hormona del crecimiento invertía algunos de los efectos del envejecimiento en los varones ancianos. Todos los hombres sometidos a estudio presentaban bajos niveles de hormona del crecimiento en su sangre, como se estima que ocurre con un tercio de los hombres y mujeres que han cumplido los 55 años. (Las empresas farmacéuticas están investigando otros frentes de posible aplicación, osteoporosis y obesidad entre ellos, que podrían representar un mercado mundial de miles de millones de dólares.)

Los resultados del estudio en varones ancianos indican que la hormona constituye un fármaco de efectos altamente apreciados. Investigadores de la Facultad de Medicina de Wisconsin y del Centro Médico de los Servicios para Veteranos de Milwaukee hallaron que seis meses de autoinyecciones aumentaban la masa activa del cuerpo en un 8,8 por ciento en promedio, reducían su grasa en un 14,4 por ciento y ensanchaban el espesor de su piel en un 6,6 por ciento. Si los estudios ulteriores prueban que esos cambios corporales favorecen el vigor y la funcionalidad, la hormona del crecimiento podría traer un verdadero soplo de vida a la tercera edad.

Un 15 por ciento de aumento en el vigor muscular capacitaría al anciano para hacerse la comida o ir por sí solo al cuarto de baño. El desarrollo de los músculos implicados en la expectoración podría evitar la pneumonía; unas piernas robustecidas en su masa muscular protegerían la cadera de las fracturas. Pero se desconocen los efectos del fármaco a largo plazo. Por sus cualidades estimulantes, la hormona podría abrir la puerta al cáncer o la diabetes.

Las empresas que deseen obtener la aprobación de la FDA para suministrar hormona del crecimiento a los ancianos tendrán que demostrar sus efectos médicos específicos, antes de venderla como "la droga milagrosa de la tercera edad". Su aplicación más probable será la de la lucha contra la fragilidad, o tal vez como coadyuvante en el proceso de recuperación tras la intervención quirúrgica. Genentech patrocina también los estudios de sus efectos en la osteoporosis de mujeres ancianas, que se llevan a cabo en la Universidad de Stanford; se espera saber los resultados a mediados del año que viene.

Asimismo, en la Universidad Washington de San Luis, Kevin Yarasheski, experto en fisiología muscular y deportiva, está comparando los méritos relativos de la hormona del crecimiento sola, el levantamiento de pesos solo y ambos regímenes combinados en ancianos con bajos niveles de esa proteína en sangre. "La hormona del crecimiento tiene por misión esencial estimular la síntesis de proteínas: no se puede crecer sin fabricar proteínas", dice Yarasheski. "Podría, pues, ser que, al añadir un segundo estimulante —es decir, el ejercicio— se favoreciese la masa muscular y el vigor de los ancianos."

La hormona del crecimiento es el fármaco cuyas pruebas se encuentran más adelantadas en relación con dolencias que afectan a un número restringido de pacientes, tales como la insuficiencia renal crónica y el síndrome de Turner. Genentech está acometiendo ensayos clínicos del medicamento contra el Turner, desorden cromosómico causante del infantilismo de las niñas. En un campo similar opera Bio-Technology General, cuyos derechos de mercado para su hormona recombinante del crecimiento han sido cedidos a DuPont. SmithKline Beecham tiene concedidos los derechos de la hormona del crecimiento de Bio-Technology General para Europa y América del Sur.

Genentech ha estudiado también los efectos de la hormona del crecimiento en personas obesas con el objeto de comprobar si les facilita un mejor aprovechamiento de las calorías. Aunque no perdieron peso, sus cuerpos se volvieron más esbeltos durante el tratamiento. John D. Baxter, director de investigación metabólica en la Universidad de California en San Francisco y miembro del primer grupo que aisló y copió esta proteína, considera que la obesidad fomenta la hipertensión y promueve la diabetes no dependiente de insulina. "Cabe pensar que la pérdida de grasa mejore ambos procesos, pero necesitamos saberlo", advierte.

La proteína está ayudando a niños que sufren graves quemaduras a sanar con mayor rapidez, informa Genentech. Algunos investigadores creen que la pérdida de masa corporal, o depauperación, que acompaña al SIDA y es también secuela de algunos traumatismos, podría mitigarse con la hormona. El fármaco puede ayudar a los pacientes de cáncer a mantener el peso y resistir mejor la quimioterapia. Se está ensayando como sustituto de los fármacos contra la esterilidad en ciertos experimentos de fecundación in vitro.

La hormona del crecimiento hu-

USOS POTENCIALES DE LA HORMONA DEL CRECIMIENTO

INDICACION	PACIENTES EN LOS EE.UU.
Infertilidad	1.600
Insuficiencia renal crónica	3.000
Síndrome de Turner	7.000
Niños deficientes en hormona del crecimiento*	10.000
Depauperación	17.000
Quemaduras que requieren hospitalización	70.000
Envejecimiento	7.500.000
Osteoporosis	20.000.000
Obesidad	29.000.000

*Aprobado por la FDA

mano no es el único específico que provoca iras y produce dinero. La eritropoyetina (EPO), estimulante de los glóbulos rojos, conoce ventas anuales de millones de dólares. La zidovudina (AZT) contra el SIDA representa para Burroughs Wellcome una espléndida fuente de ingresos.

Si los actuales ensayos clínicos corroboran las esperanzas, la hormona del crecimiento habrá superado el último escollo legal. Quizá los médicos no esperen que la FDA apruebe el específico para recetarlo en otras indicaciones. Una vez que un fármaco ha recibido el visto bueno para un uso determinado, nada impide que los galenos lo prescriban para situaciones que no figuran en el prospecto.

Unese a ello que no todo el mundo está en contra de que un médico prescriba la hormona del crecimiento para una dolencia si hay esperanzas de tratamiento con éxito. Es un problema de frontera, y borroso. Muchos medicamentos han curado antes de superar los trámites legales. Tal ocurrió con los bloqueantes beta contra la hipertensión, y la cimetidina y ranitidina contra las úlceras; o el caso más espectacular del nitroprusiato sódico, fármaco cardíaco al que nunca se le reconoció legalmente ese destino.

De partículas a ondas

Según la mecánica cuántica, los electrones se comportan como partículas y como ondas. Hasta ahora, sin embargo, la tecnología electrónica ha aprovechado sólo su carácter de partícula. Por una buena razón: cuandos los electrones se mueven a través de un material, chocan con los átomos, dispersándose en muchas direcciones. Con tanta colisión, difícilmente pueden los electrones imitar las ondas.

Pero el panorama está cambiando. A lo largo de los últimos diez años, se han ido perfeccionando las técnicas para fabricar emparedados de arseniuro de galio y aleación galio-aluminio, hasta el punto de que los electrones recorren sin impedimento un centenar de micrometros antes de ser dispersados y pueden, por tanto, comportarse como las ondas luminosas. Investigadores de los laboratorios Bell de la AT&T y los del centro de investigación Thomas J. Watson de la IBM han comenzado a aplicar las leyes de las ondas luminosas a esos chorros de electrones "balísticos".

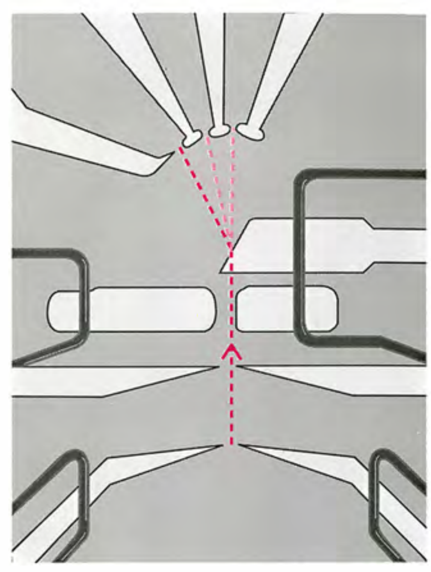
Ambos grupos han construido "lentes electrónicas" para focalizar los haces de electrones. El verano pasado, AT&T informó que había creado un "prisma" para alterar las trayectorias de los electrones. Tiene, además, solicitada la patente sobre un dibujo litográfico que permite que dos haces de electrones de baja tensión se crucen en ángulo recto sin estorbarse entre sí, de manera muy parecida a como lo hacen los haces luminosos.

El trabajo se desarrolla todavía en el dominio de la investigación básica. Pero si las técnicas tienen éxito, la "óptica electrónica abrirá nuevos horizontes en electrónica", dice Karl Hess, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. En vez de los transistores binarios, los "sí-no" convencionales, podrían conseguirse dispositivos capaces de conmutar entre diversos estados, opina ahora Mordehai Heiblum, que dirige el trabajo de física de la microestructura en IBM. Esta capacidad podría reducir el número de transistores necesarios para construir las potentes pastillas de circuitos integrados ("chips"). Los haces electrónicos que normalmente se comportan como ondas podrían simplificar el trabajo de los ingenieros de pastillas, que se han venido esforzando por sacar partido de las propiedades de las ondas asociando componentes ópticos y electrónicos en el mismo microcircuito.

Los principios de la óptica electrónica mantienen una correspondencia con los de la óptica clásica. En ésta, por ejemplo, la luz se refracta de manera conocida cuando atraviesa una materia transparente; un haz de electrones balísticos es análogamente frenado y desviado cuando encuentra un material con diferente densidad de carga, o tensión aplicada.

Para construir el primer prisma electrónico, Joe Spector, Horst L. Stormer y sus colaboradores, de los laboratorios Bell, depositaron fotolitográficamente un electrodo metálico sobre un material de arseniuro de galio. Cuando se aplican pequeños voltajes a este electrodo, actúa como un prisma, frenando y desviando un haz de electrones dirigido a uno de sus bordes. Variando el voltaje, los investigadores pueden ordenar el haz hacia un colector de los tres que hay. En principio, podrían desviarse los haces a muchos colectores más. La lente electrónica funciona de forma similar. Pero el electrodo depositado en el substrato de arseniuro de galio tiene muescas cóncavas en los lados opuestos que focalizan el haz de electrones según lo haría una lente óptica.

Existen ciertas limitaciones. Spector indica que el trabajo exige materiales de excepcional pureza para minimizar la dispersión de los electrones. Los investigadores deben también enfriar los dispositivos por debajo de cuatro kelvin para reducir las vibraciones térmicas. El mismo haz de electrones balísticos que virtualmente no choca con otras partículas tiende a dispersarse, a semejanza del haz de luz que se ensancha al propagarse; por ello, los investigadores siembran el substrato con estructuras que canalicen los electrones hacia los elementos focalizadores. Aun así, sólo un uno o dos por ciento de los electrones alcanza los colectores.



"PRISMA" METALICO que desvía los electrones. Alterando el voltaje aplicado a este electrodo, la corriente de electrones se dirige a cualquiera de los tres colectores. Fuente: laboratorios Bell de AT&T.

Heiblum piensa en nuevas metas. Hasta ahora, los esfuerzos se han concentrado en canalizar los haces de electrones en una sola capa horizontal de substrato. "¿Qué ocurre con dos planos dispuestos uno encima del otro?", se pregunta. Está también tratando de incrementar la velocidad de los propios electrones, estrategia que, concede, tiende a aumentar su dispersión.

Además de refinar lentes y prismas, el grupo de AT&T trabaja en el desarrollo del dispositivo para cruzar haces electrónicos y otras nuevas técnicas ópticas. Como los microcircuitos convencionales se basan en líneas de circuito que nunca se tocan, se está intentando comprimir todavía más esas configuraciones. Los haces de electrones que pueden cruzarse simplificarían las cosas. Hasta ahora, los dispositivos de AT&T usan corrientes muy bajas, del orden de algunos nanoamperes, al objeto de dejar amplio espacio a los electrones para cruzarse sin chocar.

Aunque es probable que las técnicas de óptica electrónica tarden en introducirse en la elaboración de cir-

cuitos, ese trabajo podría espolear a los investigadores a echar un nuevo vistazo a lo que ocurre cuando los dispositivos electrónicos no se limitan a los modos sí-no.

Impuestos sobre el carbono

"Estos impuestos resuelven un importante problema político", insiste Robert Hahn, del Instituto Americano de la Empresa. "Constituyen una buena forma de obtener ingresos." El poder ejecutivo y el legislativo de los Estados Unidos han venido estudiando la posibilidad de subir el gravamen fiscal de los carburantes fósiles. Un impuesto sobre el carbono podría recortar las emisiones de dióxido de carbono en los EE.UU. en un 20 por ciento para fines de siglo, lo que consolidaría la lucha contra el calentamiento global. Y lo que le es más grato al Tesoro: de acuerdo con la Oficina de Presupuestos del Congreso (CBO), un impuesto de 28 dólares por tonelada de combustible que contenga carbono generaría 163.000 millones de dólares de aquí a 1995.

El impuesto, dice Hahn, no admite discusión. Lo que tampoco la admite es que muchos políticos consideran impopular establecer un impuesto alto para reducir las emisiones de dióxido de carbono. La CBO estima que un impuesto ambientalmente eficaz debería sacar 100 dólares por cada tonelada de carbono.

La propuesta de Pete Stark (elegido por el estado de California) de un impuesto de 25 dólares por cada tonelada de carbono en el combustible ha atraído simultáneamente las iras de las empresas eléctricas y del Fondo de Defensa Ambiental. Desde el punto de vista de los impuestos, resulta fácil la gestión sobre el carbono. Una tonelada de carbono en combustibles extraídos o bombeados del suelo es una tonelada que, con el tiempo, irá a parar al aire, de modo que el gravamen se puede imponer en el pozo, mina o frontera en vez de cobrarlo en miles de estaciones de servicio o industrias que usen carbón. No ocurre así con los contaminantes cuyos niveles de emisión dependen de la tecnología aplicada por el usuario final —verbigracia, lavaderos para extraer el azufre del carbón—, que requieren un aparato administrativo formidable.

En términos económicos, no importa dónde se imponga el gravamen. Cada fase de la cadena de distribución puede traspasar el exceso a la siguiente. En cualquier caso, el costo para el consumidor es el mismo. Además, el impuesto aparece no sólo en el precio de los combustibles, sino también en el precio de todos los bienes y servicios cuya producción requiere energía.

Las empresas eléctricas no pueden absorber un nuevo impuesto sobre la energía. Y si los EE.UU. establecieran unilateralmente un impuesto sobre el carbono, el aumento resultante en los precios de la energía podría dañar la competitividad de los productos americanos en el mercado mundial. (Aunque esto último no parece haberse cumplido en el Japón, donde los precios de la energía son ya muy elevados.)

Se discute también si ese gravamen no atentaría contra la justicia social. Para algunos economistas, el gravamen sobre el carbono se limita a exigir que el precio de los combustibles fósiles refleje su "verdadero" coste para la sociedad. Al ser principalmente carbono, el carbón sufriría la mayor tasa fiscal. De ese modo, los estados del Medio Oeste, que usan carbón y padecen como nadie las medidas de control de la lluvia ácida, cargarían con una desporporcionada parte de los impuestos sobre el carbono. Los estados del Oeste o del Sur, que dependen de la energía nuclear o hidroeléctrica, se verían injustamente favorecidos.

Un impuesto sobre el carbono podría también favorecer al rico en detrimento del pobre. Los grupos de menores ingresos gastan una proporción más alta de ellos en energía que los ricos. Se apunta que los impuestos sobre la energía incorporados en los "artículos de lujo" (combustible del reactor consumido en enviar por vía aérea un cargamento de caviar) podrían equilibrar las cargas. Pero no hay datos fiables, aun cuando los impuestos progresivos —los que gravan más en proporción a las ganancias— se consideran necesarios para la justicia social.

Lawrence H. Goulder, economista de la Universidad de Stanford, sugiere que, aun cuando el impuesto sobre el carbono no fuera progresivo, podría ayudar a eliminar algunos de los rasgos más regresivos del actual sistema fiscal. El impuesto del rendimiento personal y Seguridad Social son particularmente onerosos. No sólo castigan con mayor dureza al pobre que al rico, sino que dan cuenta de un porcentaje crecientemente mayor de la imposición total: en 1989 contribuyeron con un 80 por ciento de la cantidad recaudada del impuesto sobre la renta personal. Esos impuestos aumentan el coste del puesto de trabajo y no favorecen el empleo. Imponer gravámenes sobre el carbono y reducir los impuestos de los asalariados, sostiene, podría hacer que tanto el precio de la energía como el de los salarios reflejase con mayor justeza sus costos sociales.

Aun cuando los impuestos sobre el carbono fomentaran la restricción de emisiones, algunos economistas desaprueban en principio ese recurso fiscal para solucionar los problemas ambientales. El poder legislativo debería decidir la cuantía de contaminación permisible y dejar que las compañías compren y vendan las cuotas aceptadas. Un mercado de permisos de emisión establecería entonces el precio en su nivel natural.

Los permisos de emisión negociables y los impuestos serían intercambiables desde el punto de vista ambiental, reconoce Alice LeBlanc, pero sólo si el legislador supiera cuánto carbono dejarían de emitir los consumidores para un aumento dado del precio: la elasticidad del mercado. La verdad es que no se sabe. Los planes para recaudar dinero disfrazado de verde mediante impuestos sobre el carbono pueden con el tiempo dañar la causa del medio ambiente. Tras engrosar las arcas del Tesoro con cientos de miles de millones de dólares, los políticos se verán obligados a poner en vigor nuevas y costosas leyes para cortar de raíz las emisiones. Y los ciudadanos responderán indignados: "Ya hemos pagado para eso".

IMPACTO DEL IMPUESTO SOBRE EL CARBONO A 28$ POR TONELADA

	PRECIO EN LA FUENTE EN 1989	TIPO DE IMPUESTO	RECAUDACION POTENCIAL*
CARBON	22,85$ POR TONELADA	17$ POR TONELADA	15.000 MILLONES DE DOLARES
PETROLEO	15,85$ POR BARRIL	3,60$ POR BARRIL	23.000 MILLONES DE DOLARES
GAS NATURAL	60,4$ POR 1.000 M^3	15,9$ POR 1.000 M^3	8.000 MILLONES DE DOLARES

* Basado en el consumo actual de los Estados Unidos y en precios anteriores a la crisis del Golfo Pérsico. La oficina de presupuestos del Congreso estima que el impuesto daría una recaudación de unos 35.000 millones de dólares por año.

Fuentes: Oficina de Presupuestos del Congreso y Oficina de Información sobre la Energía.

El lenguaje de los fractales

Estas estructuras, de increíble detalle, son más que curiosidades matemáticas. La geometría fractal describe, de forma concisa y apropiada, procesos y objetos complejos del entorno natural

Hartmut Jürgens, Heinz-Otto Peitgen y Dietmar Saupe

"La geometría fractal cambiará a fondo su visión de las cosas. Seguir leyendo es peligroso. Se arriesga a perder definitivamente la imagen inofensiva que tiene de nubes, bosques, galaxias, hojas, plumas, flores, rocas, montañas, tapices y de muchas otras cosas. Jamás volverá a recuperar las interpretaciones de todos estos objetos que hasta ahora le eran familiares."

Así caracterizó el tema que vamos a tratar el conocido matemático Michael Barnsley, uno de los investigadores punteros en el terreno de la geometría fractal (y debemos reconocer que su enfoque del tema ha influido en nuestra descripción). Cierto es que Benoît B. Mandelbrot, del centro de investigación Thomas J. Watson de IBM en Yorktown Heights (Nueva York), con su concepto de los fractales, ampliamente expuesto en su libro *The Fractal Geometry of Nature*, puso en marcha una nueva forma de pensar dentro de las matemáticas y las ciencias naturales, una ola que, por su amplitud, fuerza y creatividad extraordinarias, se ha convertido en acontecimiento interdisciplinario de primer orden.

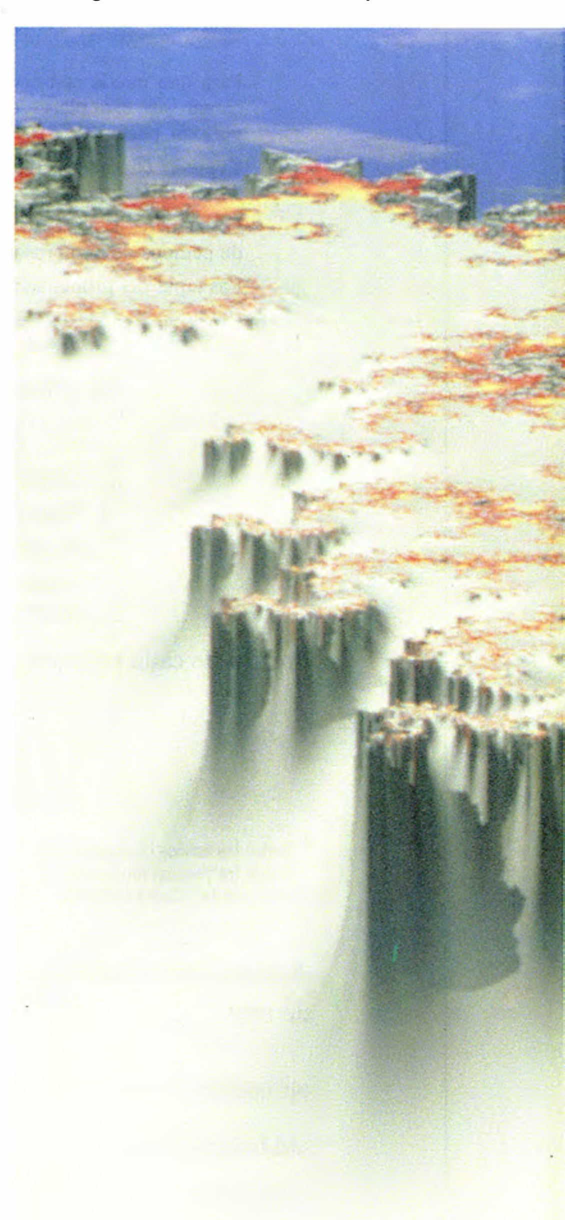
La geometría fractal es, en primer término, un nuevo lenguaje. Pero sus elementos no derivan de la intuición directa, lo que los distingue esencialmente de los elementos de la geometría euclídea, como la línea recta, la circunferencia o la esfera.

La geometría fractal se expresa por medio de algoritmos, es decir, por medio de reglas e instrucciones de procedimiento, que requieren la ayuda de un ordenador para convertirse en formas y estructuras. Además, están disponibles en cantidades ilimitadas. Pero, una vez se domina el nuevo lenguaje, la descripción de una nube, por ejemplo, se hace tan precisa y simple como lo sería la de una casa mediante el plano de un arquitecto en el lenguaje de la geometría tradicional.

La esencia del mensaje de Mandelbrot es que muchas estructuras naturales (como, por ejemplo, las nubes, las montañas, las líneas de las costas o las grietas tectónicas, los pequeñísimos capilares sanguíneos, las superficies de ruptura de materiales y otras muchas semejantes) que aparentan tener una complejidad extraordinaria, poseen en realidad una misma regularidad geométrica: la denominada invariancia bajo escala. Esto significa que, si se analizan estas estructuras a distintas escalas, se encuentran una y otra vez los mismos elementos básicos. Su interrelación a distintas escalas encuentra una descripción matemática apropiada mediante el concepto de dimensión fractal.

El significado de la invariancia bajo escala tiene un notable paralelo en la teoría del caos, también de gran actualidad, que ha proporcionado a los investigadores de la naturaleza y a los

HARTMUT JÜRGENS, HEINZ-OTTO PEITGEN y DIETMAR SAUPE trabajan en matemática de los sistemas dinámicos complejos, los fractales y el grafismo por ordenador en el Instituto de Sistemas Dinámicos de la Universidad de Bremen, en el que han creado un laboratorio de matemática experimental. Peitgen se doctoró en matemáticas por la Universidad de Bonn en 1973. Es profesor de la disciplina en la Universidad de Bremen, así como en la de California en Santa Cruz. Sus trabajos se centran en el análisis no lineal y las ecuaciones diferenciales, los métodos numéricos, los sistemas dinámicos y los fractales. Saupe y Jürgens se doctoraron en matemáticas por la Universidad de Bremen en 1982 y 1983, respectivamente. El primero es profesor ayudante de matemáticas y, director del laboratorio del grupo, el segundo.



1. REPRESENTACIONES tridimensionales del conjunto de Mandelbrot; son parte de las utilizadas para estudiar su estructura fractal, compleja y fascinante. La que ofrecemos representa el potencial eléctrico que rodearía a un conjunto de Mandelbrot dotado de carga eléctrica. El difuso parecido del conjunto de Mandelbrot con rasgos del mundo real sirve de indicio de la abundancia de estructuras fractales en la naturaleza. La imagen proviene de una cinta de vídeo preparada por los autores y sus colegas con imágenes animadas, generadas por ordenador.

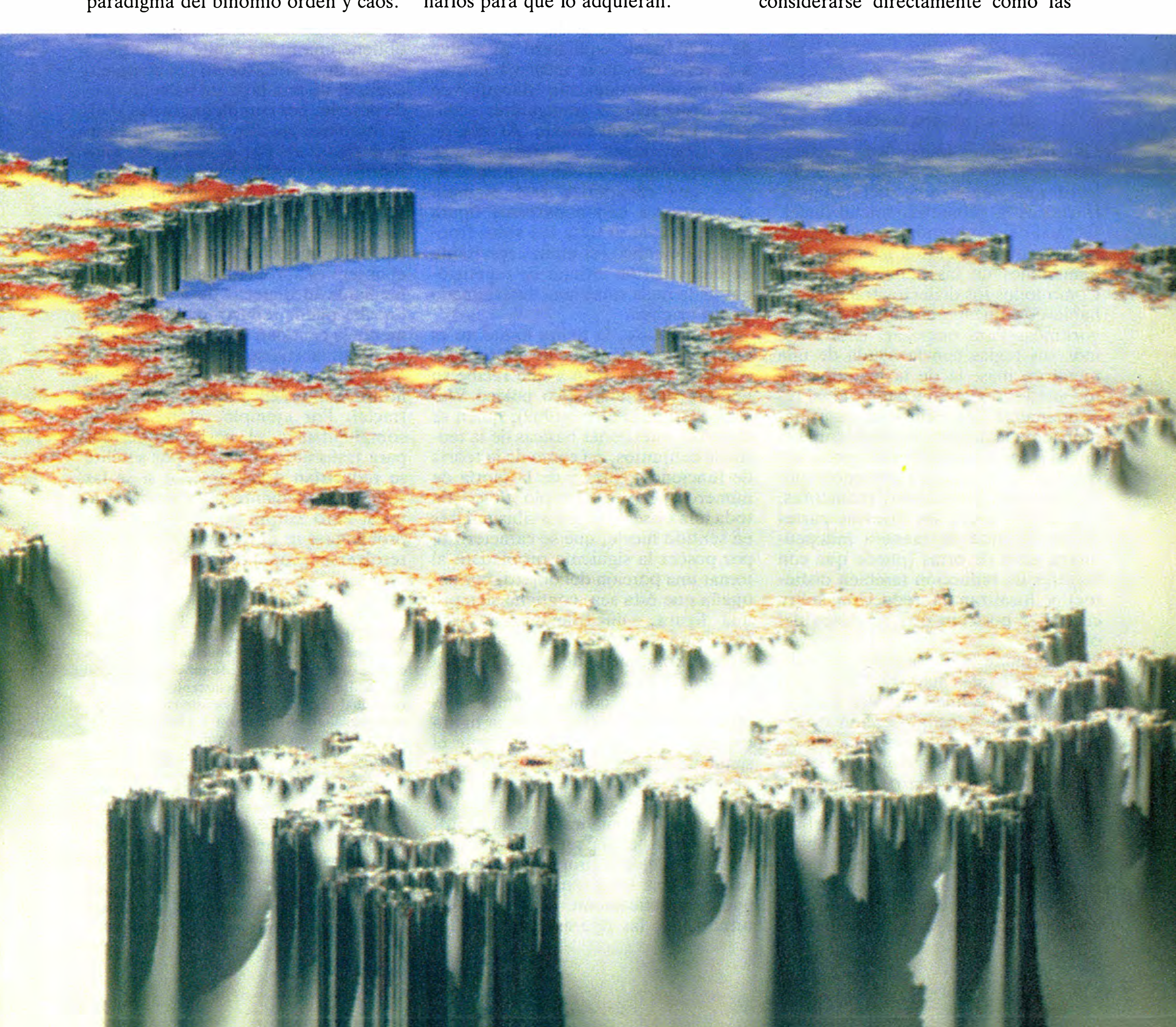
matemáticos la extraordinaria sorpresa de que hay muchos fenómenos que, a pesar de ser rígidamente deterministas, no son básicamente predecibles. La relación entre ambas teorías no es casual, sino que pone de manifiesto un parentesco mucho más profundo.

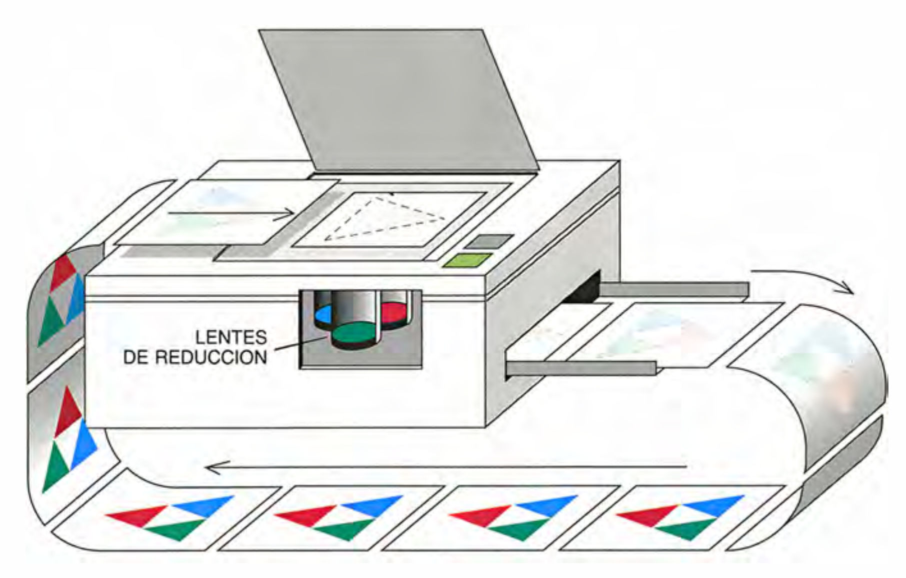
Todo esto se pone de manifiesto de forma impresionante en un modelo matemático descubierto por Mandelbrot en 1980 y conocido hoy por doquier como el conjunto de Mandelbrot. Este objeto, de gran complejidad y quizás el más bello que la matemática haya puesto a nuestro alcance hasta ahora, presenta una riqueza extraordinaria de formas y estructuras. También plantea toda una serie de problemas matemáticos, que se contraponen con la sencillez de las reglas que lo describen de manera clara y precisa, al tiempo que permiten su construcción.

El conjunto de Mandelbrot es un paradigma del binomio orden y caos. Sin embargo, su propiedad tal vez más fascinante no se ha descubierto hasta hace muy poco: puede interpretarse como un diccionario gráfico de infinidad de algoritmos, convirtiéndose así en un repositorio de imágenes fractales muy eficaz y organizado.

Para introducirnos en la geometría fractal y empezar a abordar algunas de sus características fundamentales nos parece oportuna una metáfora lingüística. Mientras que las lenguas occidentales se escriben con la ayuda de un alfabeto finito, las lenguas orientales, como el chino, utilizan tal número de signos que bien podríamos decir que poseen infinitos elementos. En las lenguas occidentales hay que combinar las letras para formar palabras, que son las portadoras del significado. Por el contrario, los símbolos chinos ya son significativos por sí mismos, sin que sea preciso combinarlos para que lo adquieran.

De manera análoga a las lenguas occidentales, que poseen un alfabeto finito (por ejemplo, el latino), la geometría euclídea tradicional posee sólo contados elementos, como la línea recta, la circunferencia, etcétera. Con estos pocos elementos se construyen objetos más complejos, que ya pueden asimilarse a objetos reales, es decir, empiezan a tener significado. (En cierto sentido, podemos decir lo mismo de otras geometrías más modernas, como la geometría riemanniana, que sirve de base a la teoría de la relatividad de Einstein.) Por el contrario, la geometría fractal correspondería a la familia de las lenguas orientales. Se compone de un número infinito de elementos, radicalmente distintos de los euclídeos. ¿Qué son, pues, estos elementos? La manera más simple de describirlos consiste en identificarlos con reglas de cálculo o algoritmos. Tales algoritmos pueden considerarse directamente como las





2. MAQUINA COPIADORA que reduce y multiplica el original. Si se la realimenta en bucle, origina una figura fractal. Varias lentes transforman una imagen inicial (entrada) en otra nueva (salida), que es un pastiche de copias reducidas de la primera. El resultado vuelve a tomarse como entrada.

unidades significativas del lenguaje fractal.

El dialecto lineal del lenguaje fractal

Hay dos grupos lingüísticos fractales básicos: el lineal y el no lineal. El dialecto más importante del lenguaje fractal es la geometría fractal lineal. Es fácil de comprender y conduce de modo muy adecuado a las ideas fundamentales de las demás variantes. Como todos los dialectos fractales, se habla con un número infinito de algoritmos. Para empezar, describiremos sus reglas con la ayuda de una metáfora más: la de la máquina fotocopiadora que reduce el original repetidamente. En principio, esta máquina imaginaria es una copiadora ordinaria con la opción reductora del original. Pero nuestra copiadora posee además varias lentes reductoras, que actúan sobre las diversas partes de un original de manera independiente unas de otras (puede que con factores de reducción también distintos) y localizan la reducción sobre cualquier posición que se desee del original.

Si formamos un conjunto retroalimentado de tales máquinas, cada una de ellas define una regla del dialecto fractal lineal, y cada elección de las lentes —es decir, de sus factores de reducción y sus posiciones— define otra. La figura 3 (*centro*) muestra un ejemplo concreto de algoritmo recursivo. Obsérvese cómo a partir del dibujo original, un cuadrado, se obtiene en el primer paso una configuración triple. Con ello queda descrita la regla de 'copia reducida y multiplicada': colóquense tres reducciones a la mitad del original en los extremos de un triángulo equilátero. Si vuelve a hacerse uso de la misma regla, se obtiene una ordenación triangular de tres ordenaciones triangulares reducidas, y así sucesivamente. Al cabo de seis repeticiones, o iteraciones, se empieza a observar con claridad la figura que caracteriza este ejemplo concreto. La denominaremos figura límite, ya que se trata del valor frontera matemático (el límite) resultante de una sucesión infinita de repeticiones de la regla sobre una determinada figura original.

En este caso, la figura límite no es otra que el triángulo de Sierpinski, conocido desde 1916 y que recibe su nombre del matemático polaco Waclaw Sierpinski (1882-1969), quien se ocupó de cuestiones básicas de la teoría de conjuntos, así como de la teoría de funciones reales y de la teoría de números. Es un ejemplo típico de toda una clase de objetos sibisimilares en sentido fuerte, que se caracterizan por poseer la siguiente propiedad: al tomar una porción del objeto, por pequeña que ésta sea, contiene siempre una figura —un triángulo en este caso— que, ampliada suficientemente, nos proporciona de nuevo la figura original.

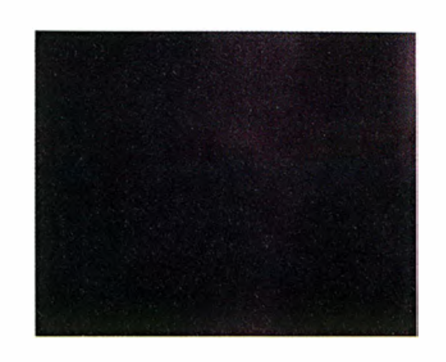
Ahora bien, ¿cómo depende la figura límite de la elección de la figura original? Vamos a verlo mediante el siguiente experimento [*véase la figura 3*], en el que usamos dos figuras iniciales distintas: una vez un triángulo y, la otra, la palabra SPEKTRUM. La regla de 'copia reducida y multiplicada' vuelve a proporcionarnos al cabo de seis iteraciones una imagen que es prácticamente la misma. Naturalmente, las figuras obtenidas difieren en los pequeños detalles: cuadrados, triángulos y palabras SPEKTRUM, respectivamente, pero la figura límite es siempre igual. Queda determinada por el algoritmo elegido, es decir, en este caso por la forma específica de efectuar la 'copia reducida y multiplicada'. Este resultado, que parte de una idea del matemático John E. Hutchinson, puede describirse y demostrarse de manera general y de modo bastante simple.

Las reducciones y desplazamientos (así como las rotaciones, reflexiones especulares, seccionamientos y sus combinaciones) se agrupan dentro de la denominación común de transformaciones lineales afines del plano. Se caracterizan por el hecho de transformar rectas en rectas. A partir de n transformaciones de este tipo $[f_1,\ldots,f_n]$ puede especificarse de manera unívoca una regla del dialecto fractal lineal. El comportamiento límite garantiza que, con independencia de la figura original, cada vez se obtiene una figura límite y sólo una.

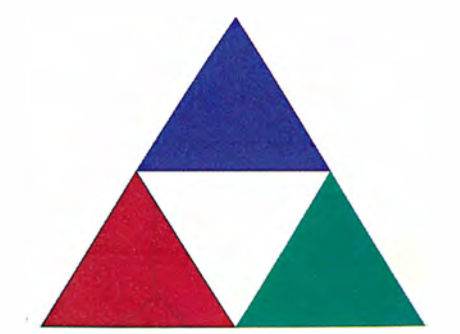
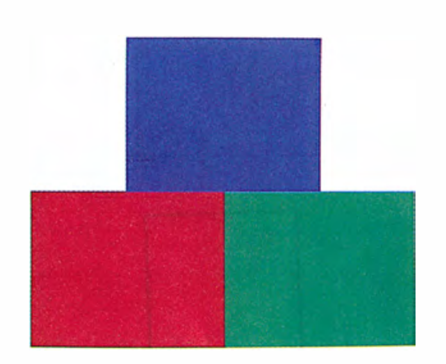
Una figura de aspecto tan complejo como el de una hoja de helecho queda descrita por completo gracias al algoritmo con tan sólo 24 números [*véase la figura 4*]. Por el contrario, para representar punto a punto la figura de la misma hoja de helecho con calidad de pantalla de televisor, se precisan unos cuantos centenares de miles de valores numéricos. Así pues, cuando el objeto es apropiado, su descripción mediante el dialecto de los fractales lineales puede reducir extraordinariamente la cantidad de información que ha de almacenarse o transmitirse.

En ello reside una posibilidad de utilización práctica de la geometría fractal. Por ejemplo, el tiempo, la complejidad y el coste requeridos para transmitir imágenes por satélite se reducirían drásticamente si se las codificase mediante algoritmos fractales. Pero esto mismo constituye un problema que lleva largo tiempo sin resolverse: ¿cómo hallar, dada una fi-

3. MEDIANTE EL BUCLE de realimentación de la máquina de copia reducida y múltiple se obtiene siempre, a partir de un cuadrado o de otra figura arbitraria, exactamente la misma figura final (figura límite); en este caso, el triángulo equilátero de Sierpinski. La correspondiente regla de "copia reducida y multiplicada" queda descrita por medio de tres transformaciones lineales afines f del plano, que aplican un punto (x, y) en el punto $(0{,}5x + b_1, 0{,}5y + b_2)$. Difieren entre sí por los tres pares de valores de las b : $b_1 = 0$, $b_2 = 0$; $b_1 = 0{,}5$, $b_2 = 0$; $b_1 = 0{,}25$, $b_2 = 0{,}43301$. En cada caso, de arriba abajo se observa el resultado de una, dos, cuatro y seis iteraciones. Cada lente proporciona a la copia su tonalidad de color (*rojo, azul* o *verde*); al mezclarse aditivamente dichos colores, se obtienen entonces nuevos colores en las figuras parciales.

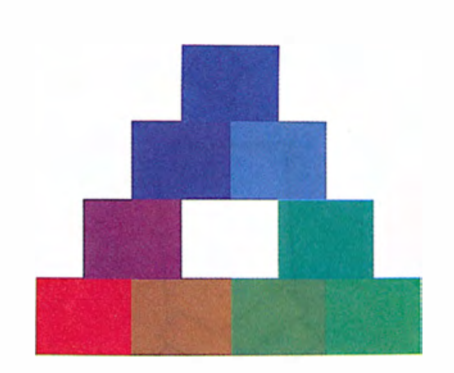



SPEKTRUM

SPEKTRUM

SPEKTRUM SPEKTRUM

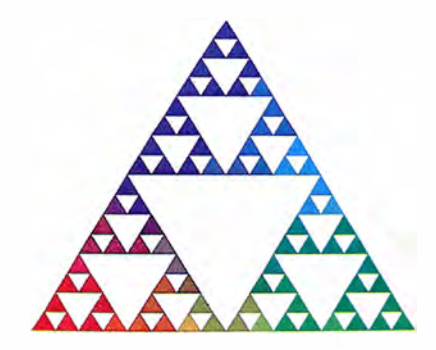
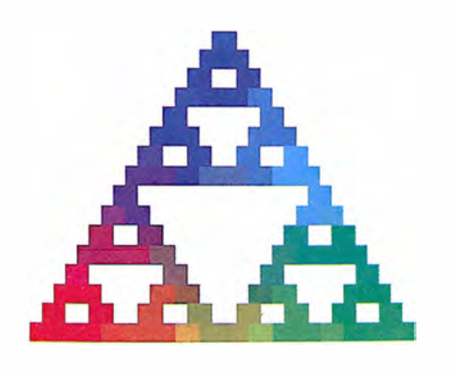



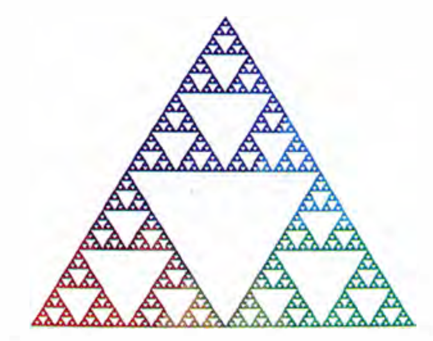
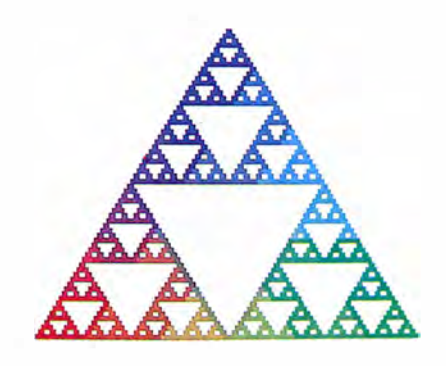
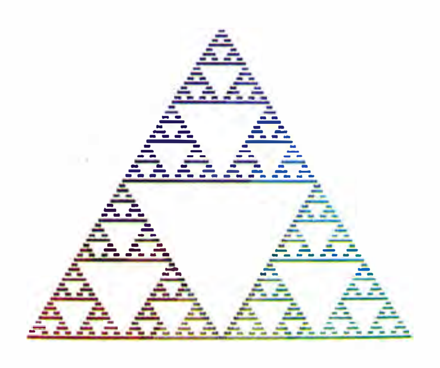
SPEKTRUM

SPEKTRUM SPEKTRUM

SPEKTRUM SPEKTRUM

SPEKTRUM SPEKTRUM SPEKTRUM SPEKTRUM

CURVA DE KOCH					
a_{11}	a_{12}	a_{21}	a_{22}	b_1	b_2
0,33333	0,0	0,0	0,33333	0,0	0,0
0,33333	0,0	0,0	0,33333	0,66666	0,0
0,16667	-0,28867	0,28867	0,16667	0,33333	0,0
-0,16667	0,28867	0,28867	0,16667	0,66666	0,0

HELECHO					
a_{11}	a_{12}	a_{21}	a_{22}	b_1	b_2
0,0	0,0	0,0	0,17	0,0	0,0
0,84962	0,0255	-0,0255	0,84962	0,0	3,0
-0,1554	0,235	0,19583	0,18648	0,0	1,2
0,1554	-0,235	0,19583	0,18648	0,0	3,0

HOJA					
a_{11}	a_{12}	a_{21}	a_{22}	b_1	b_2
0,64987	-0,013	0,013	0,64987	0,175	0,0
0,64948	-0,026	0,026	0,64948	0,165	0,325
0,3182	-0,3182	0,3182	0,3182	0,2	0,0
-0,3182	-0,3182	0,3182	0,3182	0,8	0,0

4. ALGUNOS ELEMENTOS del dialecto lineal: la curva de copo de nieve de Koch, un helecho (debido a Michael Barnsley) y una hoja de planta fanerógama. Las transformaciones afines correspondientes pueden representarse en la forma $f(x,y) = (a_{11}x + a_{12}y + b_1, a_{21}x + a_{22}y + b_2)$; los parámetros a_{ij} y b_i se indican en cada caso encima de su figura. De arriba abajo: figura original, segunda y cuarta iteraciones, y figura límite.

gura arbitraria definida punto a punto, una familia de transformaciones $[f_1,\dots,f_n]$, lo más pequeña posible, que represente dicha figura con la precisión que se quiera, fijada de antemano? Se está trabajando de manera muy intensa en esta cuestión, sobre todo por parte de Barnsley, con aportaciones fundamentales de Adrien Douady y John H. Hubbard.

Desde luego, el problema es siempre resoluble de manera trivial, a saber, eligiendo para cada punto negro, P_k, de la figura dada (retículo puntual) una transformación f_k tal que tenga como figura límite dicho punto; la colección de estas transformaciones f_k posee como figura límite la figura dada. Pero es evidente que tal codificación resulta poco atractiva, ya que precisa tantas transformaciones f_k como puntos negros tenga la figura.

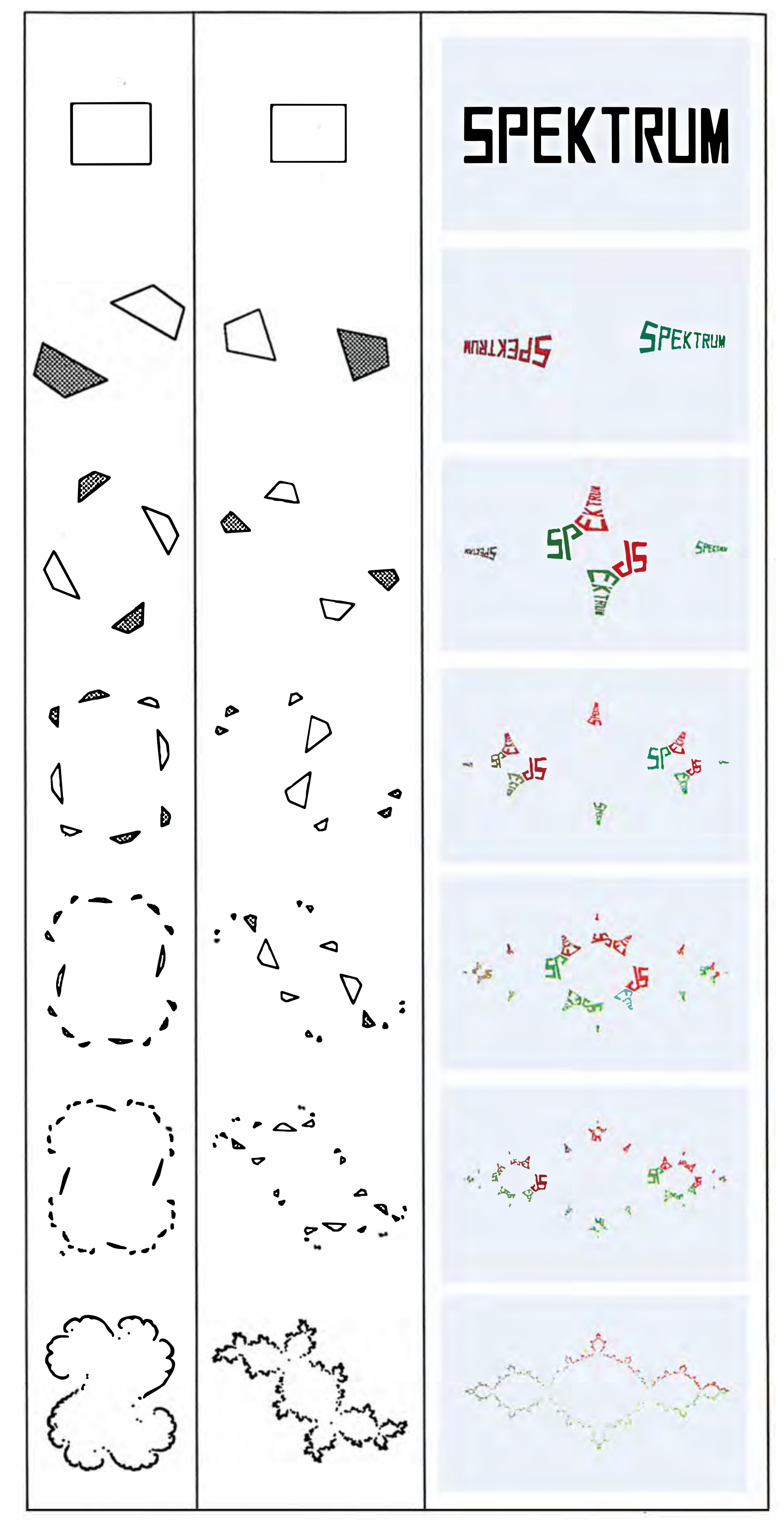
La cuestión interesante y fundamental para la geometría fractal es reducir todo lo posible el enorme número de f_k iniciales. El problema admite además muchas generalizaciones. Por ejemplo, pasar de figuras en blanco y negro a figuras con tonalidades grises intermedias o incluso a figuras en color. Indiquemos, por lo menos, cómo podría construirse una codificación para figuras en color a partir de figuras en blanco y negro.

El juego del caos y una receta de codificación

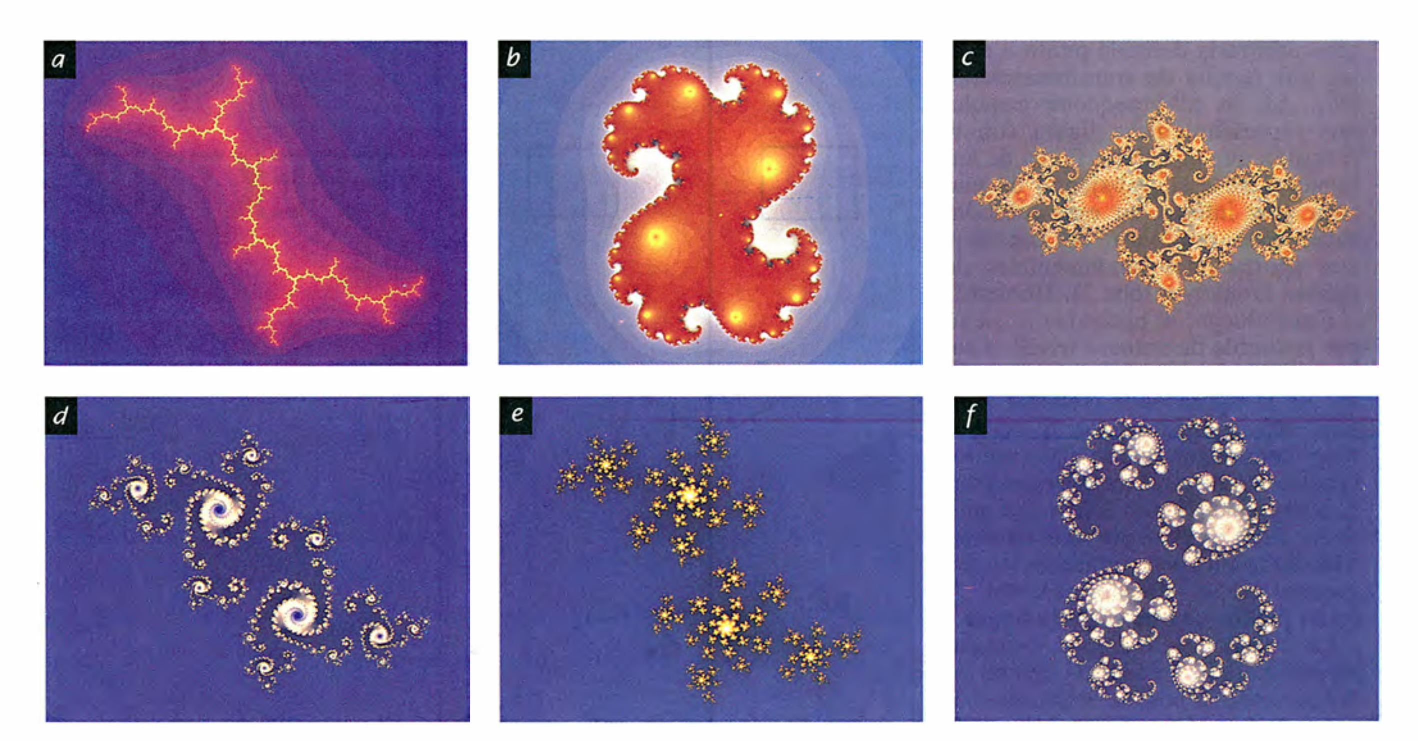
Consideremos de nuevo el helecho (matemático) de la figura 4. Se observa que la segunda de las cuatro transformaciones asociadas al mismo solamente efectúa una pequeña reducción (ya que a_{11} y a_{22} son muy poco inferiores a 1). Si comenzamos con un rectángulo, en cada aplicación de las transformaciones se obtienen las cuatro figuras reducidas correspondientes. El número de cuadriláteros se multiplica así por cuatro de copia en copia, de modo que, después de m aplicaciones de la transformación, el número final es de 4^m.

Para conseguir que los pequeños cuadriláteros, que todavía se reconocen con claridad al cabo de cuatro pasos, se hagan tan pequeños que empiece ya a verse la figura límite [*el helecho de la figura 4, abajo*], se deben efectuar unas 50 iteraciones, con lo que se obtienen 4^{50} —es decir, unos 10^{30}— cuadriláteros minúsculos. Un cálculo como éste queda fuera del alcance de cualquier ordenador actual.

¿Cómo, pues, han podido dibujarse las figuras límite de la figura 4 (helecho y hoja)? Con ayuda de un algoritmo al que denominaremos juego del caos. Imaginemos, para ello, un dado que sólo tuviese cuatro números, del 1 al 4, correspondientes al nú-



5. FIGURA ORIGINAL, quinta iteración y figura límite de tres elementos del dialecto cuadrático. Cada uno de ellos consta de un par de transformaciones del plano complejo y queda determinado por un parámetro complejo *c*. La actuación no lineal de las transformaciones se observa por la deformación de la palabra en el tercer ejemplo. Las figuras límite son conjuntos de Julia; sus valores de *c* corresponden aproximadamente a los de las figuras 1*e* (*izquierda*), *a* (*centro*) y *h* (*derecha*).



6. LOS CONJUNTOS DE JULIA son fronteras fractales resultantes de la iteración de la transformación cuadrática $z^2 + c$. Adoptan una alucinante variedad de formas, dependientes exclusivamente del número complejo c, llamado parámetro de control. Determinados valores de c originan conjuntos de Julia de una pieza (*izquierda*), mientras que los resultantes de otros valores son disgregados y pulverulentos (*derecha*). El conjunto de Mandelbrot está formado por todos los puntos c asociados a conjuntos de Julia conexos, por lo que puede servir de índice de los conjuntos de Julia.

mero de transformaciones de la figura 4 en cuestión (el dado debería tener la forma de un tetraedro). Para empezar el juego, elegimos un punto arbitrario del plano y lo marcamos. Lanzamos ahora el dado, con lo que seleccionamos al azar una de las cuatro transformaciones $[f_1,\ldots,f_4]$, aplicándola a continuación sobre el punto marcado. El resultado es un nuevo punto del plano. Tiramos el dado una vez más y aplicamos la transformación correspondiente sobre el punto que acabamos de obtener, y así sucesivamente.

Puede demostrarse que (con probabilidad 1) la sucesión de puntos así construida llena densamente la figura límite y que la figura obtenida (en blanco y negro) no depende ni de la sucesión concreta de tiradas ni del dado utilizado, es decir, no depende de las probabilidades seleccionadas para cada f_k. (De todos modos, el juego debe encaminarse primero hacia la figura límite, por lo que los primeros −digamos 100− puntos de la sucesión se eliminan.) Por otra parte, la figura límite se obtiene de manera mucho más rápida si las f_k no se eligen simplemente al azar, con idéntica probabilidad.

En otras palabras, a cada transformación contractora −o contracción− f_k puede asignársele una probabilidad P_k, con la que entre a tomar parte en el juego del caos. Con esta generalización puede conseguirse que la sucesión de puntos del juego del caos barra en promedio con la misma frecuencia cada uno de los puntos de la figura límite. La velocidad de formación de la figura se reduce sensiblemente cuando a las f_k que son poco contractoras se les asigna una probabilidad P_k mayor.

Este artificio permite especificar también figuras con semitonos, codificando mediante un número la frecuencia con que se marca un punto de la figura, lo que nos dará el valor de su tonalidad gris. Con una elección adecuada de las P_k puede obtenerse efectivamente un valor predeterminado de gris para cada punto de la figura, es decir, su frecuencia deseada. Si esta misma técnica se aplica a los tres colores fundamentales (rojo, verde y azul), pueden codificarse figuras de colores.

Pero, veamos, el hecho de que las figuras límite de las figuras 4 y 5 hayan resultado tan bien, ¿se debe a la pura casualidad o existe, por el contrario, una receta mediante la cual sea posible asignar a cualquier figura dada una sucesión de transformaciones específica f_k que la codifique?

La verdad es que tal receta existe, pero sólo para las estructuras más sencillas (las casi sibisimilares), respecto de las cuales proporciona una solución muy aceptable del problema, aunque no pueda expresarse en forma de un algoritmo automático para ordenador. La idea de la receta es la siguiente. Consideremos una figura que ha de codificarse. Se trata de conseguir una máquina de 'copia reducida y multiplicada' que proporcione una figura límite que se ajuste lo suficientemente bien a la figura dada. Para ello se eligen (por ejemplo, mediante ensayos repetidos sobre una pantalla gráfica) las transformaciones $[f_1,\ldots,f_n]$ tales que una única pasada de su resultado por la máquina de 'copia reducida y multiplicada' sólo lo modifique ligeramente. Entonces la figura límite correspondiente a las $[f_1,\ldots,f_n]$ será también bastante parecida a la figura dada. La receta que acabamos de presentar puede emplearse (como ya sabemos) con el mismo resultado sobre cualquier figura inicial.

Dialectos fractales no lineales: conjuntos de Julia y de Mandelbrot

Mientras que, en el fondo, no hay más que un único dialecto lineal de nuestro lenguaje para estructuras complejas, el número de dialectos no lineales es infinitamente grande. Sin embargo, destaca uno de ellos, al tiempo que tiene una especial relevancia matemática. Le daremos el nombre de dialecto cuadrático. Está estrechamente relacionado con la teoría del caos y sus elementos pueden obtenerse de una ecuación matemática muy sencilla.

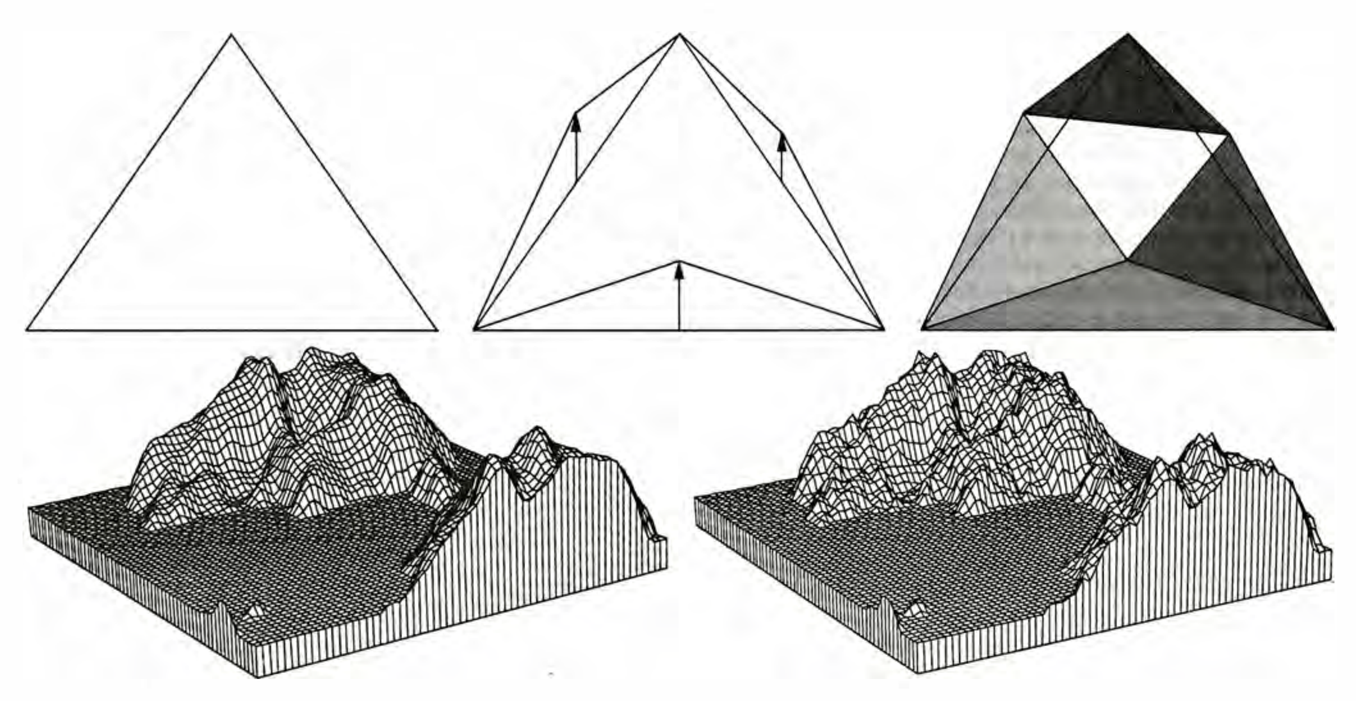
Las raíces de la teoría matemática correspondiente se remontan a una obra maestra, muy reputada en la actualidad, del matemático francés Gaston Julia (1893-1978), quien la escribió en 1918 en un hospital de campaña, siendo herido de guerra. Pero sus trabajos, así como los contemporáneos de su duro contrincante Pierre Fatou (1878-1929), se sumergieron pronto en el olvido y sólo han vuelto a ser populares tras la obra de Mandelbrot. Los logros intelectuales de Julia y de Fatou han de ser tanto más considerados cuanto no hay que olvidar que no disponían de ningún tipo de ordenador como medio para representar sus objetos, debiendo apoyarse exclusivamente en su capacidad imaginativa.

Julia y Fatou se plantearon el problema de determinar qué sucede con un punto z del plano complejo cuando se le aplica de forma repetida (iterativamente) la transformación $g(z) = z^2 + c$ [véanse "Juegos de ordenador"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1985, enero de 1988, mayo de 1989 y septiembre de 1989]. El número complejo c es aquí un parámetro de control que podemos ajustar arbitrariamente. En casos sencillos, al aplicar g iterativamente sobre los puntos de un entorno del origen de coordenadas, éstos se concentran sobre un punto dado (punto fijo de la aplicación g), mientras que los puntos más alejados del origen se dispersan, dirigiéndose hacia el infinito. Cada uno de estos dos tipos de puntos constituye una región; en medio queda una frontera infinitamente delgada, que hoy se conoce con el nombre de conjunto de Julia. Al ir aplicando g iterativamente, los puntos de ambas regiones se van alejando del conjunto de Julia, hacia dentro o hacia fuera, respectivamente.

Al objeto de encontrar el conjunto de Julia, puede intentarse efectuar el proceso inverso al de huida de sus puntos, con lo que nos acercaríamos a él. Para ello tenemos a nuestra disposición una transformación que invierte exactamente el efecto de g (es decir, g^{-1}). Por efecto iterativo de esta transformación inversa, cualesquiera puntos arbitrariamente elegidos por dentro o por fuera del conjunto de Julia irán cayendo hacia el mismo. Esto es así incluso en el caso general en que el conjunto de Julia no sea una línea divisoria entre dos regiones cuyos puntos se distingan por tener comportamientos distintos bajo iteración. Es más, en ello se fundamenta el llamado método de iteraciones inversas (MII), que constituye el dialecto cuadrático de nuestro lenguaje fractal.

La inversión de $g(z) = z^2 + c$ está formada por dos aplicaciones: $f_1(u) = +\sqrt{u - c}$ y $f_2(u) = -\sqrt{u-c}$ (ya que para los números complejos, como para los reales positivos, existen dos raíces cuadradas con signos opuestos). Estas transformaciones no lineales deben incorporarse ahora a nuestra máquina de 'copia reducida y multiplicada'. La figura 5 muestra su actuación para tres valores distintos del parámetro c. A consecuencia de la no linealidad, en general, las líneas rectas se transforman en líneas curvas. A partir de la figura inicial obtenemos primero dos figuras más pequeñas, luego cuatro, luego ocho, hasta que poco a poco la figura límite va tomando forma. Como en el caso lineal, la figura límite no depende de la inicial: queda completamente determinada por f_1, f_2 y el parámetro c.

Hasta aquí hemos aprendido a hablar en dos dialectos del lenguaje fractal: lineal uno de ellos, cuadrático el otro. Llegamos ahora a una de las cuestiones más difíciles y, al mismo tiempo, más fascinantes de la geometría fractal. En el símil de las lenguas, la podemos formular así: ¿existen en los dialectos fractales relaciones generales entre las reglas gramaticales? Y si las hay, ¿qué aspecto tienen? Con mayor rigor matemático, la pregunta se formula así: ¿existe un principio de ordenación de la clase infinita de los conjuntos de Julia? La respuesta nos conduce a uno de los descubrimientos más bellos de la matemática experimental. La idea de la solución se basa en el hecho, ya conocido por Julia y Fatou, de que, para todo parámetro de control c, la figura resultante corresponde necesariamente a uno de los dos casos siguientes: (*a*) El conjunto de Julia es conexo, es decir, de una sola pieza; (*b*)



7. FRACTALES ALEATORIOS construidos mediante desplazamientos de puntos medios. En el ejemplo que se muestra, los puntos medios de los lados de un triángulo se desplazan perpendicularmente al plano del triángulo, hacia arriba o hacia abajo. Para fijar la magnitud de estos desplazamientos pueden prescribirse normas diversas, dependiendo del aspecto global de la superficie que se quiera modelar, cuya forma se aprecia en el diagrama obtenido mediante ordenador. (La representación de la superficie precisa de un dispositivo gráfico suplementario que una todos los puntos resultantes de los desplazamientos, al objeto de hacerla visible. En este ejemplo, la superficie se ha modelado mediante una red de cuadrados.)





8. SENCILLO ARBUSTO (*izquierda*) **generado mediante el axioma** F **y las reglas de sustitución** $F \rightarrow F[+F]F[-F]F$, $+ \rightarrow +$, $- \rightarrow -$, $[\rightarrow [$ **y** $] \rightarrow]$. **En la interpretación gráfica, los giros a la izquierda (−) y a la derecha (+) son de 28,58 grados (es decir, un séptimo de 180 grados). El símbolo [significa el comienzo de una nueva rama, que termina al aparecer el símbolo]. También puede generarse con un sistema L la planta de zanahoria silvestre** (*derecha*), **como hizo Przemyslaw Prusinkiewicz. El modelo incorpora el proceso de aparición de las flores. Aquí la flor superior es la más vieja y desarrollada. En las hojas pueden reconocerse las estructuras sibisimilares naturales.**

el conjunto de Julia es completamente disconexo, como una nube de polvo formada por infinitos puntos (denominado conjunto de Cantor).

Con ello, podemos ya presentar al conjunto de Mandelbrot. Se define como el conjunto de todos los puntos c del plano complejo que dan origen a un conjunto de Julia conexo. Es decir, que, para obtener una gráfica por ordenador del conjunto de Mandelbrot, lo que hay que hacer es marcar un punto negro en el plano complejo para cada valor de c que origine un conjunto de Julia conexo.

¿Cómo es posible, sin embargo, decidir en la práctica si se trata de la primera o la segunda de las alternativas? La respuesta se la debemos, de nuevo, a la magistral obra de Julia. Basta verificar el comportamiento límite de la sucesión iterativa de $g(z) = z^2 + c$ para un solo valor inicial, el punto crítico $z = 0$. La figura límite correspondiente a c es conexa cuando y sólo cuando la sucesión obtenida mediante iteraciones sucesivas a partir de $z = 0$ de Mandelbrot caracteriza una famino diverge hacia infinito. Si esta secuencia no escapa hacia el infinito, el conjunto de Julia asociado es conexo y el punto c pertenece al conjunto de Mandelbrot.

Cada una de las partes del conjunto de Mandelbrot caracteriza una familia de conjuntos de Julia afines. Por ejemplo, el cuerpo principal central, en forma de corazón, del conjunto de Mandelbrot caracteriza a ulteriores conjuntos de Julia, que aparecen como círculos ligeramente deformados (y algunos fuertemente retorcidos). Aunque el conjunto de Mandelbrot no es exactamente sibisimilar, como lo eran los helechos y el triángulo de Sierpinski que hemos mostrado antes, comparte con ellos una propiedad análoga: con una ampliación suficiente, es posible descubrir en su frontera infinidad de minúsculas copias del propio conjunto.

La propiedad sin duda más fascinante del conjunto de Mandelbrot es que puede considerársele un almacén infinitamente eficaz de figuras. Ello se debe a que el conjunto de Mandelbrot no sólo clasifica a los conjuntos de Julia en conexos y disconexos, sino que además es un índice gráfico directo de una infinidad de conjuntos de Julia distintos. No ha terminado todavía de precisarse matemáticamente el alcance de este descubrimiento. De todos modos, gracias al notable trabajo de la joven matemática china Tan Lei, que trabaja en la Universidad de Lyon, ya se conocen particularidades realmente sorprendentes sobre el mismo.

Fractales aleatorios

Todos los fractales comentados hasta ahora pueden ser considerados deterministas, dado que el azar no desempeña ningún papel en su construcción. Incluso los fractales que aparecen en el juego del caos son también deterministas. La elección aleatoria de la reducción utilizada es cuestión auxiliar, diseñada para hacer lo más eficaz posible la formación de la figura. La figura límite en sí es totalmente independiente de la elección de las probabilidades utilizadas. En los denominados fractales aleatorios, que vamos a considerar ahora, la situación es distinta.

Presentemos brevemente, y a modo de ejemplo, una construcción representativa de un conjunto mucho mayor [*figura 7*]. Se empieza con un triángulo dibujado en un plano horizontal y se marcan los puntos medios de sus lados. Se trazan rectas perpendiculares al plano por dichos puntos y se marca aleatoriamente, hacia arriba o hacia abajo, un punto arbitrario sobre cada una de ellas. Con el punto así obtenido en cada lado se forman, uniéndolo con los dos puntos extremos de los lados del triángulo inicial, tres triángulos, sobre cada uno de los cuales se efectúa ahora la misma transformación. Y así sucesivamente.

Con este método de desplazamiento del punto medio, las magnitudes de elevación o depresión resultan de una ley de distribución, que se ajusta de manera que la figura límite del fractal se aproxime adecuadamente a la superficie a modelar. Por ejemplo, si la superficie ha de resultar relativamente poco accidentada, se elegirá para las transformaciones una ley según la cual los desplazamientos de los puntos medios se hagan ya muy pequeños al cabo de pocas iteraciones [*figura 7, abajo a la izquierda*], mientras que, para la representación de una montaña joven, por ejemplo, se elegirán desplazamientos que decrezcan de modo relativamente lento con las repetidas iteraciones. Está bien claro el objetivo que se persigue con la elección del principio de aleatoriedad en este tipo de construcción: se pretende modelar la forma de la superficie.

Hay muchas variaciones de este principio. Desde que se descubrió, se

ha aplicado, entre otras cosas, a la búsqueda de leyes y modelos de la erosión de las montañas o para investigar el movimiento de fallas tectónicas en relación con datos sísmicos. Richard F. Voss, colega de Mandelbrot en el centro de investigación de IBM, ha creado con esas ideas modelos de planetas, lunas, nubes y montañas que se aproximan de forma engañosa a la realidad.

Sistemas L

El biólogo Aristid Lindenmayer desarrolló en 1968 un modelo para la descripción de formas de plantas haciendo uso de estas ideas y métodos, aunque con una variante determinística. Dicha variante conduce a una clase especial de fractales, que se ha denominado, en su honor, sistemas L, y que ofrece extraordinarias analogías con los lenguajes naturales. Estos sistemas trabajan con sucesiones constituidas por símbolos, por ejemplo letras del alfabeto, y con algunos caracteres especiales, como los signos + y −, así como con reglas de sustitución. Del mismo modo que la máquina de ‘copia reducida y multiplicada’ transforma cualquier figura en otras *n*, de acuerdo con unas reglas bien determinadas, en el caso de los sistemas L sus reglas definen una transformación de una sucesión de símbolos en una nueva sucesión, en el sentido de que cada símbolo que aparece en la sucesión primitiva se sustituye por otro o, en general, por toda una cadena de símbolos (de una misma colección).

Sólo en una segunda etapa se da a los símbolos una interpretación geométrica: de acuerdo con el esquema de la geometría de la tortuga de Seymour Papert [véase “Juegos de ordenador, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1984], cada uno de los símbolos se sustituye, en función de ciertas reglas de interpretación de los mismos, por el rastro dejado por cierto movimiento de una tortuga imaginaria que avanzase por la pantalla. Por ejemplo, una *F* podría significar un trayecto de movimiento rectilíneo hacia adelante; un signo +, un giro de 60 grados hacia la derecha; y el −, otro de la misma magnitud hacia la izquierda.

Como ejemplo, tomemos para empezar el símbolo de partida *A* junto con las dos reglas de sustitución siguientes:

$$A \rightarrow B \text{ y } B \rightarrow AB$$

En este sistema L, el símbolo *A* debe sustituirse por *B* y el *B* por la pareja *AB*. Sigamos ahora la acción del sistema L. En el primer paso el símbolo de partida *A*, también llamado axioma, queda simplemente reemplazado por el *B*, de acuerdo con la primera regla de sustitución dada. Tras la aplicación del segundo paso del sistema L, obtenemos *AB*, de acuerdo con la segunda regla de sustitución; es decir, ahora tenemos un término con dos símbolos. Siguiendo del mismo modo, obtenemos una sucesión cuyos primeros términos son

A,
B,
AB,
BAB,
ABBAB,
BABABBAB,
ABBABBABABBAB,
BABABBABABBABBABABBAB,

etcétera. La longitud de los términos de la sucesión crece de forma rápida, de modo que, al cabo de ocho pasos, el término correspondiente ya no cabe en una línea de texto. Concretamente, el número de letras de cada término es, respectivamente, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34,... Esta sucesión numérica recibe el nombre de sucesión de Fibonacci: cada término de la misma es igual a la suma de los dos que le preceden.

¿Qué tiene esto que ver con los fractales? La respuesta se verá clara seguidamente, si reemplazamos el sistema L precedente por otro constituido por el axioma *F* y las reglas de sustitución

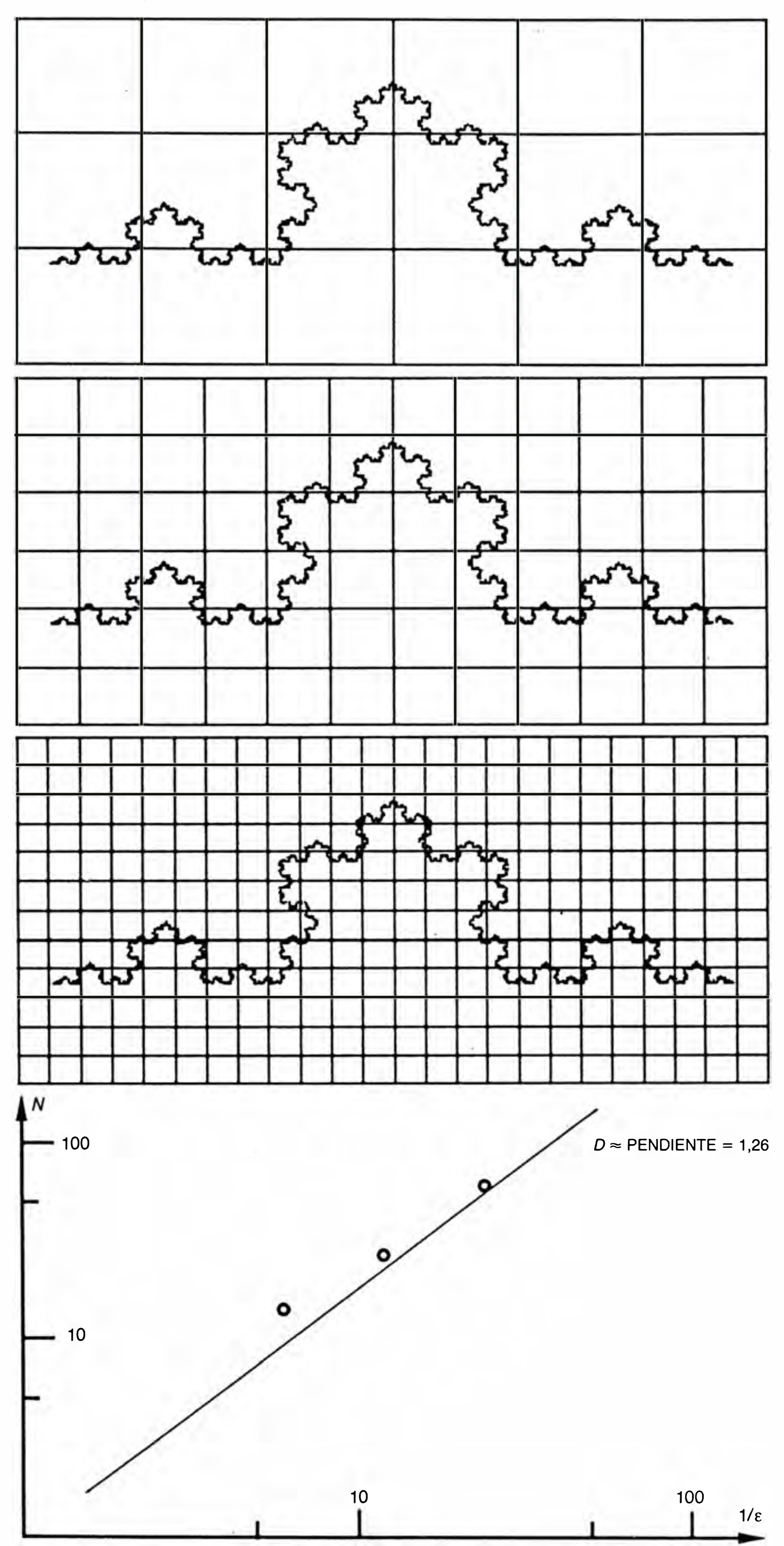
$$F \rightarrow F{-}F{+}{+}F{-}F$$
$$+ \rightarrow +$$
$$- \rightarrow -$$

	NUMERO *a*	FACTOR DE ESCALA *s*	LEY
SEGMENTO	3	3,0	$3{,}0^1 = 3$
CUADRADO	9	3,0	$3{,}0^2 = 9$
CUBO	27	3,0	$3{,}0^3 = 27$

9. EL CONCEPTO INTUITIVO de dimensión de un objeto puede expresarse de manera muy sencilla bajo la forma de la ley de escala $a = s^D$. Si dividimos un segmento en, por ejemplo, tres partes iguales, el total es tres veces más largo que cada trozo. Si dividimos un cuadrado en porciones iguales, de manera que el lado del cuadrado total sea tres veces mayor que el de los cuadrados en que se divide, se obtienen 3^2, es decir 9 porciones. Para un cubo obtenemos $a = 3^3$ cubitos componentes iguales. La dimensión de la geometría euclídea clásica, dada por un exponente entero, aparece también en las unidades de longitud usuales: metro cuadrado = m^2, metro cúbico = m^3.

	NUMERO *a*	FACTOR DE ESCALA *s*	DIMENSION *D*
CONJUNTO DE CANTOR	2	3,0	log 2/log 3 = 0,631
CURVA DE KOCH	4	3,0	log 4/log 3 = 1,262
TRIANGULO DE SIERPINSKI	3	2,0	log 3/log 2 = 1,585
CURVA DE PEANO	2	3,0	log 9/log 3 = 2,0

10. LA DIMENSION FRACCIONARIA COMO EXPONENTE aparece con facilidad en algunos fractales clásicos. Como en la figura anterior, dividamos los objetos en partes iguales y expresemos el número de partes en función del factor de escala de acuerdo con la ley $a = s^D$. Despejando *D* obtenemos $D = \log a/\log s$. Vemos así que, por ejemplo, la curva de Koch puede construirse juntando cuatro porciones iguales, siendo la curva total tres veces mayor que cada una de las partes.



11. LA DIMENSION FRACTAL de un objeto geométrico dado –en este caso la curva de copo de nieve de Koch– puede caracterizarse por medio del número de mallas que intercepta sobre un retículo. Se cuenta el número N de cuadrados que recubren el objeto. La relación entre N y el valor del lado ε (epsilon) de los cuadrados del retículo aparece claramente en un diagrama doblemente logarítmico: los puntos correspondientes se sitúan aproximadamente sobre una recta, cuya pendiente, expresada por la razón log N/log $(1/\varepsilon)$, nos proporciona el valor de la dimensión fractal D.

al que dotamos de la siguiente interpretación geométrica: el símbolo F lo sustituiremos por un segmento de línea recta hacia adelante, mientras que los símbolos + y − significarán giros de 60 grados en sentido horario y antihorario, respectivamente. Es decir, el axioma F significa, simplemente, un segmento, mientras que el resultado obtenido tras la primera sustitución, $F-F++F-F$, es una línea quebrada compuesta por cuatro segmentos. El paso siguiente da como resultado

$$F-F++F-F-F-F++F-F+$$
$$+F-F++F-F-F-F++F-F$$

Resulta evidente que el sistema L genera una sucesión de imágenes que, con una adecuada reducción a cada paso de la longitud del segmento F, convergen hacia una figura límite: la curva de Koch. De este modo el sistema L, formado por un axioma y tres reglas simples de sustitución, constituye una codificación extremadamente compacta de la curva de los copos de nieve de Koch.

En forma semejante pueden codificarse como sistemas L otras estructuras sibisimilares. Por ejemplo, el triángulo de Sierpinski se obtiene a partir del axioma F y de las reglas de sustitución siguientes:

$$F \rightarrow F--F--F--ff$$
$$f \rightarrow ff$$
$$+ \rightarrow +$$
$$- \rightarrow -$$

La interpretación gráfica de este sistema resulta ser análoga a la del caso de la curva de Koch; al ver el símbolo f, la tortuga efectúa el mismo movimiento que corresponde al símbolo F, aunque sin dejar ninguna huella.

La aplicación más importante de los sistemas L no la constituyen los fractales clásicos, sino la creación de modelos de flores, arbustos, árboles y plantas en general, en las que la ramificación constituye una característica esencial. Los investigadores del grupo dirigido por Przemyslaw Prusinkiewicz, de Regina, en Canadá, en colaboración con el biólogo Aristid Lindenmayer, han podido obtener con ayuda de sistemas L extraordinarias imágenes en color de manzanos en flor, de lilas y de otras plantas, considerando sus procesos de crecimiento.

La dimensión fractal

La característica fundamental de los fractales es su singular dimensión. Con total independencia del hecho de considerar sistemas L o figuras geométricas obtenidas mediante iteracio-

nes sucesivas, las figuras fractales límite pueden caracterizarse por medio de un concepto de dimensión que es una generalización natural de la idea que todos tenemos de dimensión espacial.

Existen varias definiciones distintas del concepto de dimensión fractal, todas las cuales, sin embargo, emanan en mayor o menor medida de un trabajo publicado por Felix Hausdorff (1868-1942) en 1919. El concepto de dimensión Hausdorff, que trataremos a continuación en forma abreviada —siguiendo a Mandelbrot—, se debe a él.

Consideremos, para empezar, objetos familiares, como segmentos, cuadrados y cubos, que tienen dimensión topológica igual a 1, 2 y 3, respectivamente. Dividamos ahora cada uno de ellos en varias partes iguales y establezcamos una relación entre el número a de las partes resultantes y el factor de escala s que convierte una cualquiera de las partes en el todo.

Como el factor de escala s es 3 en cada dimensión, resulta una ley del tipo $a = s^D$, en la que D es la dimensión. Tomando logaritmos a ambos lados de esta igualdad y despejando D, obtenemos la dimensión como cociente de dos logaritmos: $D = \log a / \log s$. Lo interesante de esta igualdad es el hecho de que la definición de dimensión no queda limitada a la consideración de espacios n dimensionales ordinarios (con n entero), ni a elementos de la geometría euclídea, sino que abarca de manera inmediata todo tipo de objetos sibisimilares.

En la figura 10 se ilustra este resultado para los casos particulares del conjunto de Cantor, de la curva de Koch, del triángulo de Sierpinski y, finalmente, de una curva que llena el plano, la llamada curva de Peano. Como puede observarse la tabla, la dimensión que corresponde a la mayoría de estos objetos (de ahí el nombre de fractales) es fraccionaria. Esta es, pues, la razón del nombre que les dio Mandelbrot en los años setenta y que hace referencia a la palabra fracción, derivada a su vez del verbo latino *frangere*, que significa romper.

Está claro que, en los ejemplos propuestos, la relación tan simple que existe entre a y s se ha podido obtener sin el menor problema porque todos los objetos considerados son ya sibisimilares, es decir, porque, en cada caso, cualquier parte de los mismos, arbitrariamente elegida y por pequeña que sea, nos proporciona el objeto completo una vez aumentada convenientemente. Con ello, la definición precedente de dimensión D, que podríamos denominar dimensión de sibisemejanza, ha cumplido por completo su misión. De todos modos, la relación $\log a / \log s$ da pie a la formulación de una definición de dimensión fractal que ya resultará útil en todos los demás casos.

A tal fin, tomemos un conjunto de partida (que para simplificar podemos considerar dentro del plano; por ejemplo, una figura hecha de puntos), y recubrámoslo mediante un retículo de cuadrados. Contemos ahora los cuadraditos que contienen algún trozo del conjunto, despreciando los vacíos. El número N de los cuadrados no vacíos depende, naturalmente, de cuál sea el conjunto dado y también del valor del lado ε de la malla del retículo. Establezcamos ahora una relación en forma de función potencial entre el valor ε y el número N de cuadraditos recubridores:

$$N = C/\varepsilon^D$$

Si repetimos el proceso con retículos de distinto tamaño y representamos los resultados en papel doblemente logarítmico, resulta que los puntos se disponen aproximadamente sobre una línea recta. Ello demuestra, para empezar, que la adopción de una funcionalidad potencial ha sido correcta; el exponente D que se obtiene de este modo no es más que la pendiente de dicha recta y recibe el nombre de dimensión fractal.

Este procedimiento no sólo puede aplicarse a objetos matemáticos. Por el contrario, puede emplearse también con objetos totalmente reales, como corrientes fluviales, nubes, perfiles de costas, árboles, helechos, arterias o las vellosidades del intestino, proporcionando en cada caso la dimensión fractal correspondiente. Por ejemplo, el espacio ocupado por las arterias del cuerpo humano tiene una dimensión fractal de 2,7.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE FRACTAL GEOMETRY OF NATURE. B. B. Mandelbrot. W. H. Freeman & Co., 1983.

THE BEAUTY OF FRACTALS. H. O. Peitgen y P. Richter. Springer-Verlag, 1986.

FRACTALS EVERYWHERE. M. Barnsley. Academic Press, Inc., 1988.

THE SCIENCE OF FRACTAL IMAGES. H. O. Peitgen y D. Saupe. Springer-Verlag. 1988.

FRACTALS FOR THE CLASSROOM. Heinz-Otto Peitgen, Hartmut Jürgens y Dietmar Saupe. Springer-Verlag, 1989.

FRACTALS: AN ANIMATED DISCUSSION, con Edward Lorenz y Benoit B. Mandelbrot. H. O. Peitgen, H. Jürgens, D. Saupe y C. Zahlten (vídeo). W. H. Freeman & Co., 1990.

Cuando el punto de fusión y de solidificación no es el mismo

Los agregados atómicos ofrecen pistas para entender los fenómenos de solidificación y fusión. Estos agregados, formados por un número escaso de átomos o moléculas, pueden coexistir en las fases sólida y líquida

R. Stephen Berry

Casi todos los sólidos tienen un punto de fusión y casi todos los líquidos un punto de solidificación. Estos dos puntos coinciden, vistos desde dos perspectivas diferentes: el hielo funde a cero grados centígrados, la temperatura más alta a la que puede ser sólido estable, mientras que el agua se congela a cero grados, la temperatura más baja a la que puede ser líquido estable. ¿Hay algo que parezca más sencillo?

Pero las apariencias a veces engañan. Los microagregados de átomos o moléculas están ofreciendo nuevas pistas para mejor entender los puntos de fusión y solidificación. Estos agregados, que constan de cuatro o cinco a unos cien o doscientos átomos o moléculas, pueden coexistir como sólidos y líquidos en cierto rango de temperaturas y presentar puntos de fusión y de solidificación diferentes.

El carácter especial de los agregados ha empujado a los investigadores, entre los que me incluyo, a explorar los secretos de sus puntos de fusión y solidificación. Los agregados, mayores que las moléculas individuales, son menores que los materiales macroscópicos, los cuales pueden considerarse con un número infinito de átomos; es por esta razón por la que exhiben las propiedades típicas de ambos límites. Debido a su tamaño intermedio, los agregados pueden abordarse casi con la precisión de sus átomos o moléculas constituyentes, al mismo tiempo que muestran ciertas características de los materiales macroscópicos.

En el futuro, los agregados atómicos podrían emplearse en la fabricación de nuevos materiales, así como en la producción de nuevas reacciones químicas. Porque pueden adoptar muchas formas estables diferentes, –un icosaedro de 55 átomos o un "balón de fútbol" de 60 átomos–, podrían condensarse formando sólidos distintos de los conocidos. Los investigadores en ciencia de materiales esperan poder diseñar materiales con propiedades microelectrónicas, mecánicas o catalíticas determinadas de antemano.

Desde los tiempos del científico inglés John Dalton al comienzo del siglo XIX, cuando la teoría atómica comenzó a recibir general aceptación, el estudio del comportamiento de la materia se realiza en dos campos. La investigación que pudiéramos llamar reduccionista se centra en las propiedades de átomos y moléculas. Este enfoque condujo, en los años treinta de nuestro siglo, a la física nuclear y a la física de partículas. Otros investigadores se han ocupado de la materia macroscópica y ponen el acento en las propiedades de grandes aglomeraciones de átomos y moléculas. Los agregados, sin embargo, tienden un puente que vincula las dos áreas de trabajo. Su exploración tuvo que esperar el desarrollo de técnicas experimentales y teóricas adecuadas, con las que se contó sólo a partir de la década de los setenta.

A diferencia de las moléculas, caracterizadas por composiciones definidas y, casi siempre, por estructuras también definidas, los agregados no están sujetos a esas restricciones. Un agregado de átomos de silicio, por ejemplo, puede contener tres, diez o cien átomos. Además, la mayoría de los agregados pueden adoptar múltiples estructuras estables, unas más estables que otras.

Los agregados difieren de los materiales macroscópicos no sólo en el número variable de átomos o moléculas que contienen, sino también en el número de ellos que residen en su superficie. En los sistemas macroscópicos, sólo una pequeña fracción de los átomos se encuentran en su parte superficial. Pero en los agregados la fracción puede ser muy grande. Así, por ejemplo, puede decirse que, en un agregado de 55 átomos de argón, 42 átomos se ubican de alguna manera en su superficie.

El fundamento teórico de la disparidad entre los puntos de fusión y de solidificación se encaja dentro de varios conceptos y, muy en particular, en el denominado pozo de potencial. Es ésta una idea general que proviene de nuestra experiencia diaria de vida bajo la acción de la gravedad. Pensemos en las colinas y valles del relieve terrestre. El fondo de un valle, o pozo, corresponde al punto en el que un objeto pesado, sometido a la gravedad, tiene una energía potencial mínima. Un balón rueda cuesta abajo hasta el fondo, y allí permanece. Una fuerza atrae o repele un objeto según la dirección que reduce su energía potencial.

Una molécula o un agregado en equilibrio también se encuentra en el fondo de un pozo de potencial, sólo que en este caso son fuerzas de tipo eléctrico, en lugar de las gravitatorias, las que, mediante atracciones y re-

R. STEPHEN BERRY ocupa la cátedra James Franck en la Universidad de Chicago. Se doctoró por la de Harvard en 1956 y dio clases en las de Michigan y Yale antes de incorporarse a la de Chicago en 1964. Ha estudiado la dinámica y termodinámica de fenómenos atómicos y moleculares y ha trabajado en el campo de la economía de recursos energéticos. Su interés en agregados atómicos surgió de una persistente fascinación por las moléculas no rígidas y la relación entre no rigidez y fase líquida.

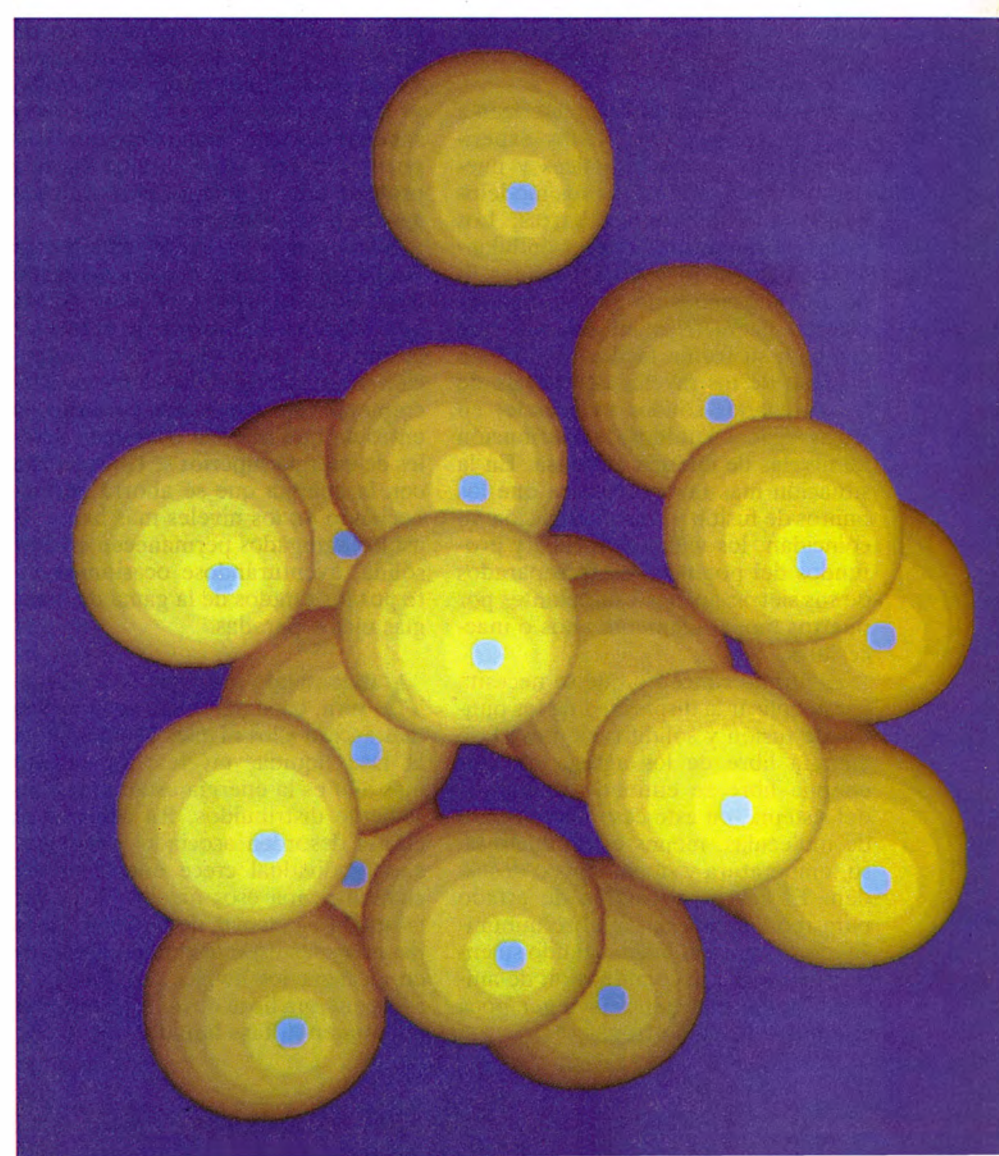
pulsiones, reducen su energía potencial. Se tienen fuerzas atractivas entre los electrones y protones de los átomos constituyentes y fuerzas repulsivas de los electrones y los protones entre ellos mismos. El balance entre los dos tipos de fuerzas determina el tamaño de los átomos, que son las distancias a las que los átomos chocan unos con otros. Los átomos no poseen la dureza de las bolas de billar, ni siquiera la de las pelotas de tenis; en buena aproximación diríamos que tienen la blandura de la almohadilla bajo el pulgar de nuestra mano.

El potencial de interacción entre dos átomos que forman un enlace presenta un valor constante cuando están alejados. Al acercarse, el potencial decrece debido a las fuerzas atractivas electrón-protón y, por debajo de cierta distancia de separación, crece súbitamente. Aunque es relativamente fácil generalizar el concepto de pozo de potencial para representar la interacción mutua de tres o más átomos, el dibujarlo es difícil porque tiene muchas dimensiones. En otras palabras, el pozo depende de demasiadas variables independientes como para representarlo en un papel o incluso en un modelo tridimensional. Sin embargo, el lenguaje e imágenes asociados a la noción de pozo de potencial siguen siendo de utilidad en el caso de varios átomos.

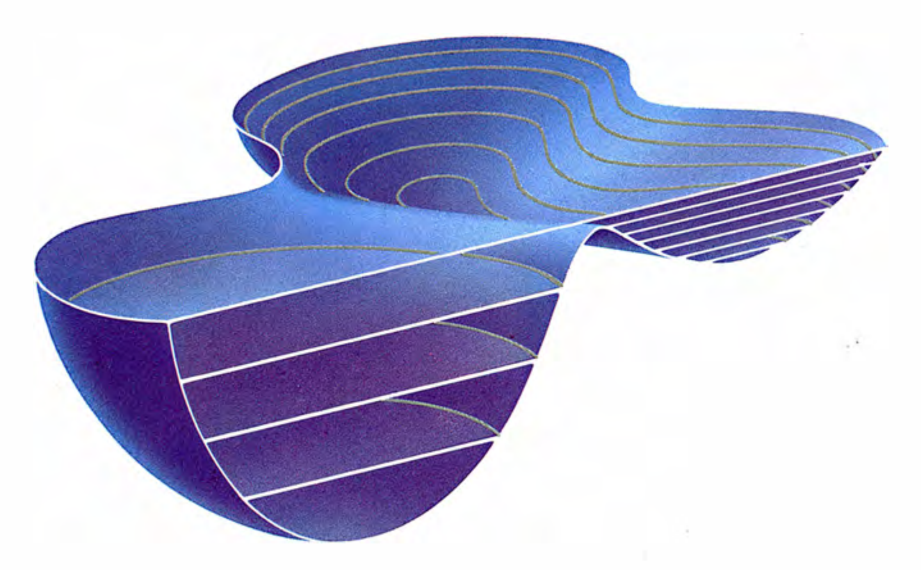
Hasta aquí hemos descrito los agregados en términos de la mecánica clásica. Pero el mundo real se caracteriza mejor a través de la mecánica cuántica. La diferencia más importante entre ambas consiste en la cuantización de las energías permitidas a un agregado. Clásicamente, desde luego, un agregado en un pozo de potencial puede tener cualquier energía, pero en mecánica cuántica la energía de un agregado está restringida a una serie discreta de niveles. Los niveles de energía forman una suerte de escalera irregular en el pozo de potencial.

La diferencia de alturas de los escalones o niveles cuantizados de energía en esta escalera es responsable, en buena medida, de que los puntos de fusión y de solidificación no coincidan: un pozo profundo y estrecho tiene unos escalones altos, mientras que los niveles de un pozo ancho están





1. AGREGADOS de 19 átomos de argón: pueden existir en estado sólido (*arriba*) o líquido (*abajo*). Los agregados sólidos presentan vibraciones rígidas y temblorosas, mientras que los líquidos carecen de estructura geométrica definida y se reordenan fácilmente. Las imágenes de ordenador fueron hechas por Thomas L. Beck.



2. POZO DE POTENCIAL, un concepto útil en la descripción del comportamiento de los agregados. Podemos imaginarnos una molécula o agregado en equilibrio como si estuviera ocupando el fondo de un pozo de potencial, cual una bola que descansa en el fondo de un valle y permanece estacionaria. Para la mecánica clásica, un agregado puede adquirir cualquier energía dentro de su pozo de potencial; en mecánica cuántica, la energía está restringida a una serie discreta de niveles (planos horizontales) que forman los peldaños de una especie de escalera irregular. Los pozos profundos y empinados tienen niveles de energía espaciados; en ellos residen los agregados sólidos. Los pozos anchos y someros poseen niveles de energía próximos entre sí; albergan a los agregados líquidos.

próximos. Los pozos pueden ser estrechos y profundos en el centro, pero se ensanchan hacia sus extremos. En este caso, los niveles de baja energía se hallan separados y, próximos, los de energías altas.

Los pozos profundos caracterizan a los agregados sólidos. Estos experimentan vibraciones atómicas y pueden rotar a la manera de los modelos moleculares de bolas y barras. Los pozos de potencial suaves y ondulantes corresponden a los agregados líquidos, los cuales no poseen una estructura geométrica definida sino que cambian su forma fácilmente. El espaciado de los niveles de energía de los agregados sólidos es grande; en los agregados líquidos, la distribución de niveles de energía es densa. En la situación más favorable para que los puntos de fusión y de solidificación no coincidan, los valles estrechos y profundos del potencial están separados de sus sierras anchas y ondulantes por puertos moderadamente altos o inaccesibles.

El último concepto que se necesita para explicar la disparidad de los puntos de fusión y solidificación es el de energía libre de los agregados. Por energía libre se entiende la energía del sistema, en este caso un conjunto de moléculas, menos el producto de su temperatura y su entropía o desorden. El agregado cambia de estado para rebajar su energía libre minimizando su energía, maximizando su entropía o con una combinación de ambos. La materia tiende a tener poca energía y mucha entropía.

Imaginemos ahora una colección de agregados mantenidos a una temperatura suficientemente baja como para que todos ellos se hallen en estado sólido. A esa temperatura, la entropía de cada agregado es pequeña, ya que los niveles se encuentran muy separados y sólo están ocupados unos pocos. En este caso, la baja energía provoca que la energía libre de cada agregado sea mínima.

Supongamos un ligero aumento de temperatura. Ahora, cada agregado tiene acceso a niveles de energías más altas –que es una forma de aumentar la entropía– llevando a una disminución de su energía libre. Pero si el incremento térmico es muy pequeño, la entropía que se gana ocupando niveles de energía superior se contrarresta con la energía que se ahorra permaneciendo en los niveles más bajos. Y así los agregados permanecen en fase sólida, aventurándose ocasionalmente por los estados de la gama de energías más separadas.

Aumentando más aún la temperatura, cada agregado va teniendo más acceso a los niveles de energía de la fase líquida, niveles que cuanto más alta es la energía están más densamente distribuidos. En consecuencia, el desorden asociado a un agregado individual crece enormemente cuando ocupa esos niveles. Esta vez la notable ganancia de entropía basta para contrarrestar la energía invertida en alcanzar los niveles del líquido, y así la energía libre de los agregados es mínima en la fase líquida.

Bajo esas condiciones se producen algunos resultados sorprendentes. El mínimo en la energía libre para los agregados sólidos también persiste (aunque menos profundo). Debido, pues, a que la energía libre tiene dos mínimos, pueden coexistir ambos agregados, líquidos y sólidos.

Si se eleva todavía más la temperatura posterior, el balance energía-entropía se inclina en favor de los agregados líquidos y el mínimo en la energía libre para agregados sólidos se va haciendo cada vez menos pronunciado. A una temperatura suficientemente alta, ese mínimo desaparece, quedando sólo el mínimo de la fase líquida, y el balance energía-entropía favorece completamente a los agregados líquidos.

Ahora sólo pueden existir agregados líquidos. Desde la primera aparición del líquido estable hasta la desaparición del sólido estable, hay, pues, un rango de temperaturas en el que pueden coexistir los agregados líquidos y los sólidos. Dentro del rango de coexistencia, la relativa abundancia de agregados líquidos y sólidos depende de la diferencia de energías libres de las dos fases, las cuales varían con la temperatura. En particular, la fracción de agregados presentes en la fase líquida varía, en curva del tipo de S aplanada, con el aumento de temperatura.

De este modo, la densidad de niveles de energía y la competición entre energía y entropía conducen a un punto de solidificación definido, por debajo del cual sólo es estable la fase sólida, y a un punto de fusión definido, por encima del cual sólo lo es la líquida. Entre ellos hay un rango de temperaturas en el que ambas fases son estables. En otras palabras, ¡los puntos de fusión y de solidificación no son el mismo! Ahora los puntos de fusión y de solidificación se han desconectado; nada impone que necesariamente se den a la misma temperatura.

La no coincidencia de ambos puntos constituye una aparente paradoja para nuestra experiencia diaria. Sin embargo, las propiedades especiales que el tamaño intermedio de los agregados conlleva reconcilian esa contradicción. Un sistema pequeño con 10, 100 o incluso 10.000 átomos o moléculas difiere mucho de un sistema grande, con mil billones de átomos o moléculas. Para un agregado pequeño de unos 10 o 20 átomos, se infiere un rango de coexistencia de varios grados. Para un macroagregado de un millón de átomos, el rango se estima en menos de una milésima de grado. Para los materiales macroscópicos ordinarios, los límites de este rango de coexistencia están tan próximos que

probablemente no puedan distinguirse. Esta indistinguibilidad justifica el intercambio de términos, ya sea punto de fusión o punto de solidificación, para el mundo macroscópico.

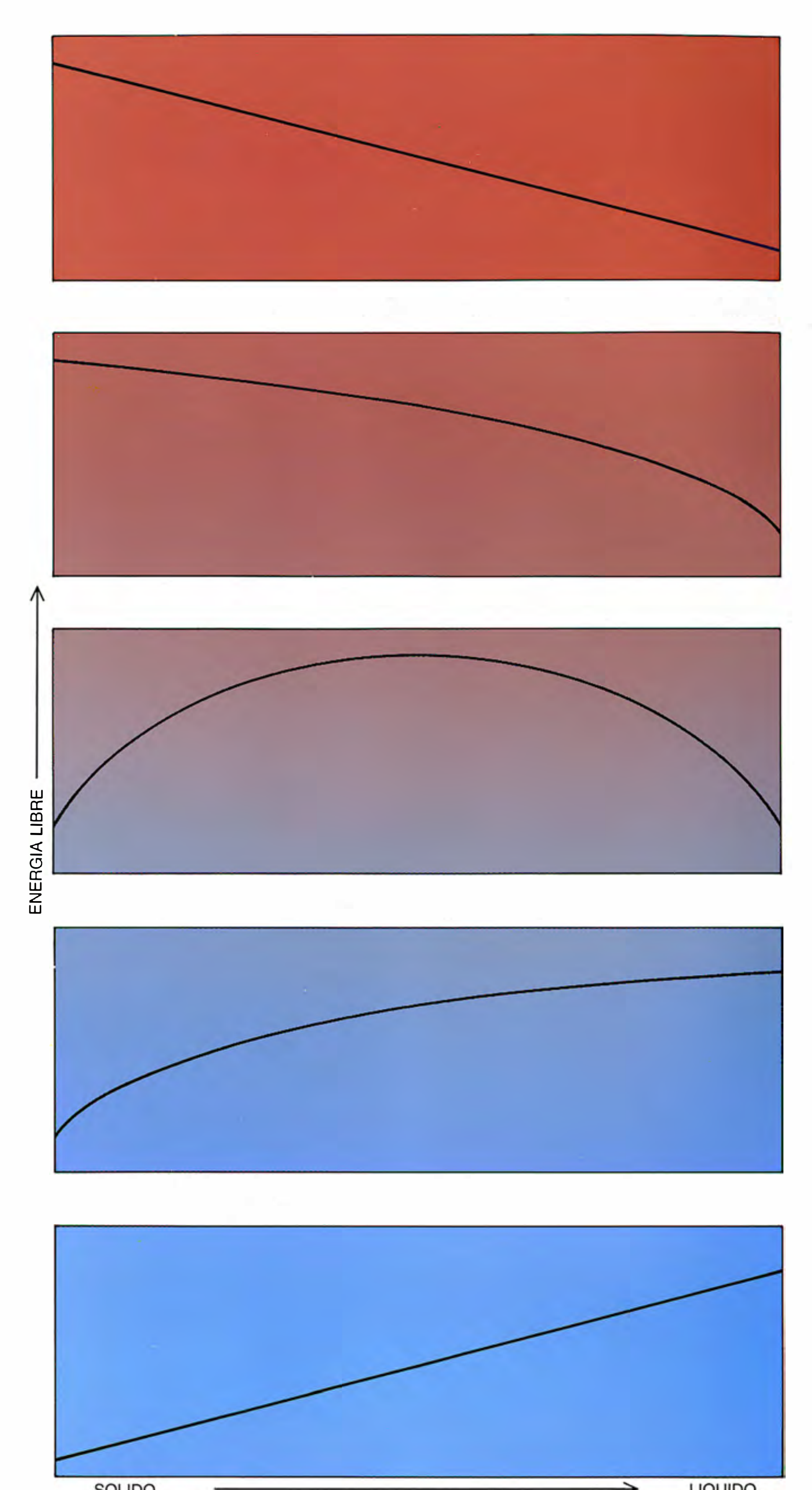
Lo mismo los experimentos que las simulaciones por ordenador apoyan la teoría de la no coincidencia de puntos de fusión y solidificación en agregados. Estos se producen en el laboratorio por agregación de los vapores atómicos o moleculares de los componentes o por ruptura de un sólido. Con ambos métodos se pueden estudiar los agregados, ya sea formando parte de un vapor o como especies atrapadas en una matriz inerte.

Para distinguir entre agregados sólidos y líquidos deben observarse las dos manifestaciones de la materia. Los sólidos son rígidos y no maleables; se pueden golpear, por ejemplo. Los líquidos, por contra, son blandos y maleables; no se puede presionar el agua con un dedo, pues a la más mínima presión cede. (Claro que, si la fuerza se aplica muy rápido, hasta el líquido parece sólido, como bien sabe quien distraídamente se cae de plancha en una piscina.)

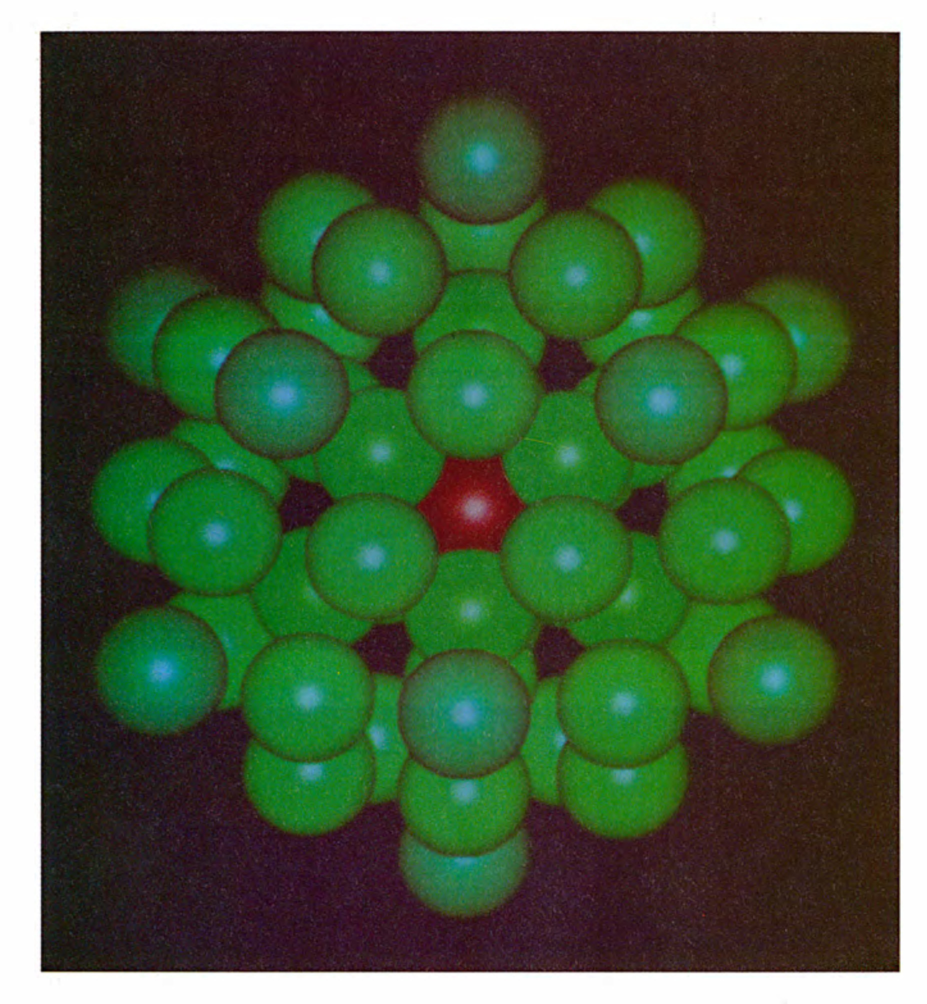
Un agregado sólido no es maleable porque está casi completamente restringido a vibraciones atómicas alrededor de una configuración geométrica (o valle particular). El agregado puede experimentar un millón o hasta mil billones de vibraciones alrededor de una configuración antes de cambiar a otra, siempre que disponga de energía para hacerlo. (Un agregado típico vibra unos 10.000 billones de veces por segundo.) Un agregado líquido es maleable porque pasa fácilmente de una configuración a otra (de un valle a otro). El agregado puede vibrar sólo unas pocas veces, unas centenas como mucho, antes de cambiar de configuración.

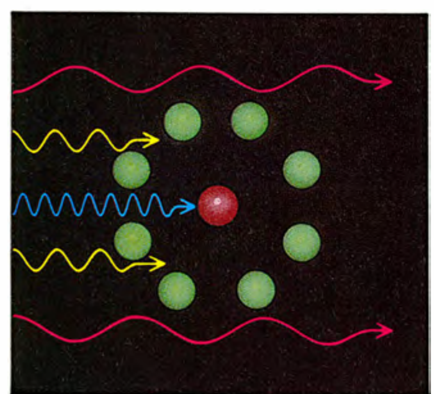
Para que los agregados sean observables como sólidos o líquidos deben ser capaces de pasar un tiempo suficiente en la fase de que se trate. Los líquidos han de permanecer líquidos suficiente tiempo para poder mostrar sus propiedades características y, muy en especial, la de explorar un número grande de configuraciones geométricas a través del reordenamiento laxo de sus átomos. Los agregados sólidos deben exhibir las características de rigidez y falta de maleabilidad propias de esta fase.

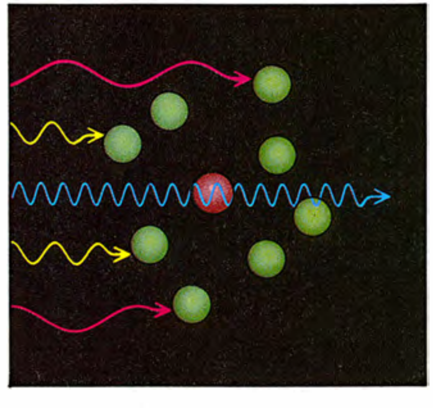
Hoy día los datos experimentales más sólidos indican, tal parece, que los agregados líquidos y sólidos pueden distinguirse realmente unos de otros. La mayor parte del trabajo realizado en esta dirección se basa en incorporar en el agregado una molécula



3. COEXISTENCIA de agregados sólidos y líquidos en un rango finito de temperaturas. La temperatura correspondiente a cada uno de los cinco paneles crece de abajo arriba. El eje vertical de cada panel es la energía libre de los agregados: la energía menos el producto de su temperatura y su entropía, o desorden. En cada panel, el eje horizontal es una medida de la no rigidez de los agregados; los agregados sólidos están a la izquierda y los líquidos a la derecha. A la temperatura más fría (*panel inferior*), la energía libre sólo tiene el mínimo correspondiente a agregados sólidos; a la más alta temperatura (*panel superior*), el que corresponde a los líquidos. En un rango intermedio de temperaturas (*tres paneles centrales*) se tienen mínimos para ambos tipos de agregados sólidos y líquidos: coexisten las dos formas y, por tanto, los puntos de fusión y solidificación no son el mismo.







4. MOLECULAS DE SONDA inmersas en agregados. Permiten a los científicos distinguir entre estados líquidos y sólidos. En el panel superior, creado por Hai-Ping Cheng, una sonda de sodio (*rojo*) está inmersa en un agregado de 54 átomos de argón. La sonda emite diferentes longitudes de onda de radiación según el agregado sea sólido (*abajo, a la izquierda*) o líquido (*abajo, a la derecha*).

extraña diferente del resto de moléculas componentes. La molécula extraña cumple el papel de sonda. El espectro de esta sonda, las longitudes de onda de emisión y absorción de radiación características, depende en parte de los átomos que la rodean, además de la propia molécula sonda. En consecuencia, el espectro de una sonda que está inmersa en un agregado sólido diferirá del mostrado si lo está en un agregado líquido.

Un método poderoso para identificar el agregado utiliza un primer láser para excitar la molécula sonda hasta un nivel de energía conocido. (La longitud de onda requerida de la radiación lasérica que se exige para inducir esa excitación depende sensiblemente del tipo de sonda y de los átomos del agregado que la rodean.) A continuación, se sintoniza un segundo láser a una longitud de onda justa para ionizar la molécula que previamente había sido excitada. Esto es, el segundo láser arranca a la sonda uno de sus electrones más externos. El electrón libre escapa, dejando al conjunto agregado-sonda con una carga neta positiva. Esta carga residual permite acelerar el agregado, mediante la aplicación de un campo eléctrico, y extraerlo de entre una mezcla de agregados. Así se le identifica de acuerdo con su masa o número de átomos o moléculas que lo componen.

Jürgen Bösiger y Samuel Leutwyler, de Berna, y Mee Hahn y Robert L. Whetten, de Los Angeles, han seguido este camino en la caracterización de agregados de argón. Los investigadores suizos utilizaban una molécula grande y aplastada denominada carbazol. El grupo de California se sirvió de una molécula de benceno, más pequeña y con forma de píldora. Cuando la sonda está inmersa en un agregado sólido produce un espectro pronunciado característico, mientras que en los agregados líquidos resulta en un espectro ancho. (A pesar de las sutilezas en la interpretación de los datos experimentales, los argumentos empleados en la caracterización de los espectros son convincentes.)

De ambos tipos de experimentos parece inferirse que, a una temperatura de unos 20 a 30 grados kelvin (−253 a −243 grados centígrados), los agregados pequeños se comportan como líquidos (con espectros anchos) y los agregados mayores como sólidos (con espectros pronunciados). Los agregados en un rango intermedio de tamaños muestran un espectro que indica una mezcla de agregados sólidos y líquidos coexistentes.

Los datos suministrados por los laboratorios de Suiza y California representan un paso importante dentro del programa experimental de la ciencia de agregados. La coexistencia de agregados sólidos y líquidos, con un rango finito de tamaños y a determinada temperatura, respalda vigorosamente la disparidad de los puntos de fusión y solidificación, aunque las pruebas no sean del todo concluyentes. Sería ideal contar con un único tamaño de agregados y variar la temperatura; sin embargo, la precisión que tal experimento requiere es difícil de alcanzar. Se necesita trabajar más para obtener una conclusión absolutamente irrefutable.

Otra forma de poner a prueba la teoría es a través de la simulación de agregados por ordenador. Naturalmente, las simulaciones son sólo eso, no experimentos reales. Pero mientras haya maneras de conocer la

validez de una simulación, el método puede revelar nuevos fenómenos y permitir experimentos mucho más económicos que sus contrapartidas de laboratorio. Sin olvidar que los modelos de ordenador ayudan a diseñar experimentos de laboratorio.

Un gran volumen de cálculo resulta idóneo para simular un sistema con una teoría bien fundamentada aunque demasiado complicada de tratar con papel y lápiz; es el caso de un agregado de átomos. De muchas sustancias se conocen las fuerzas entre dos átomos cualesquiera, pero resolver las ecuaciones del movimiento en forma analítica se hace imposible incluso para tres átomos, por no hablar para más de tres. Las ecuaciones del movimiento de varios átomos (o incluso de muchísimos) se pueden, sin embargo, resolver numéricamente con la ayuda del ordenador. Se facilita así el seguimiento de cada uno de los átomos en la simulación.

Me ocuparé, a continuación, de unas simulaciones de agregados de átomos de argón realizadas por Thomas L. Beck, Hai-Ping Cheng, Heidi L. Davis, Julius Jellinek, David J. Wales y yo mismo en la Universidad de Chicago. De entre las informaciones que tales simulaciones suministran, la más sencilla de entender es la historia de un agregado particular evolucionando en el tiempo. Una magnitud importante que surge sin complicaciones es la temperatura media de un agregado cuya energía total es constante, o su complementaria: la energía promedio de un agregado mantenido a temperatura constante. (La temperatura media es, aparte de un factor de conversión numérico, la energía cinética media.)

El significado de "promedio" en esos experimentos es crucial. Promediar la temperatura sólo una vez durante la historia entera puede resultar tan erróneo como promediar la temperatura durante un tiempo tan corto que cada átomo no haya tenido casi tiempo de encontrarse con el resto de los átomos. Tomábamos promedios en unas cinco millonésimas de millonésima de segundo, el tiempo justo para unas pocas vibraciones de los átomos de argón.

Hemos descubierto que un agregado de 13 átomos de argón con poca energía presenta pequeñísimas fluctuaciones térmicas en torno a su temperatura media. Semejante agregado frío se comporta como un sólido. Un agregado mucho más energético posee una temperatura media mucho más alta, y las fluctuaciones en torno a la misma son correspondientemente mayores. Diferentes aspectos de su comportamiento indican que el agregado está en fase líquida. Si la energía del agregado es alta, se deduce de las simulaciones que "evapora" átomos, como cabría esperar.

Entre los dos extremos hay un rango de temperaturas de agregados a energía constante en el cual algunos agregados presentan un notable fenómeno: pasan largos intervalos de tiempo como sólidos, entonces más o menos fortuitamente saltan a la fase líquida por períodos bastante largos y después vuelven a ser sólidos, y así sucesivamente. Otros agregados que muestran esa coexistencia incluyen los compuestos por siete, 15 o 19 átomos de argón.

Se debe destacar, no obstante, que no todos los agregados manifiestan con claridad la coexistencia de las dos fases. Por ejemplo, los agregados de seis, ocho o 17 átomos de argón no lo hacen. Los agregados de seis átomos de cobre presentan dos tipos de formas sólidas, unas rígidas y otras blandas. Algunos macroagregados de cloruro de sodio, según resulta de las simulaciones realizadas por Daphna Scharf y Joshua Jortner, y también por Uzi Landman, pueden exhibir regiones sólidas y líquidas simultáneamente en diferentes partes del mismo agregado. En las simulaciones de Cheng, las superficies de agregados de 52 o 55 átomos de argón funden a temperaturas bastante menores que las temperaturas de fusión de los propios agregados, descubrimiento que hace patente la importancia de los rasgos de la superficie en los agregados, contrariamente a lo que sucede en los materiales macroscópicos.

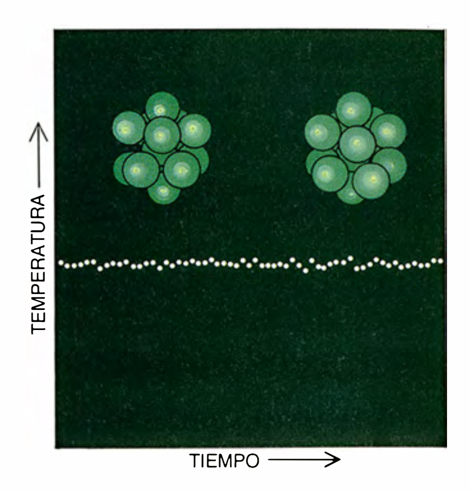
En resumen, los microagregados pueden mostrar diferentes comportamientos a medida que disponen de más energía y van haciéndose más laxos y menos rígidos. Tal riqueza de posibilidades constituye una valiosa herramienta para la exploración, más honda, de los fenómenos de la fusión y la solidificación.

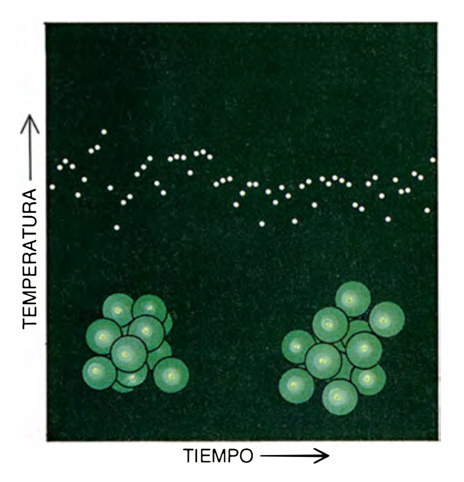
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

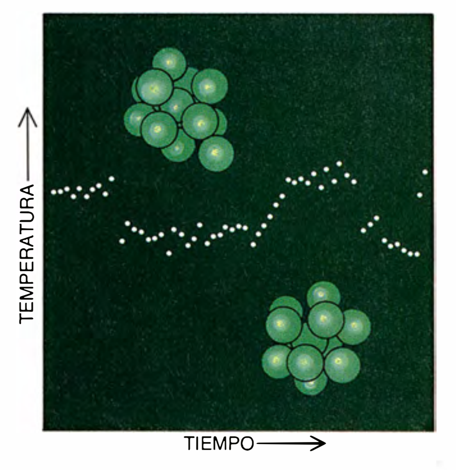
ELEMENTAL AND MOLECULAR CLUSTERS. Dirigido por G. Benedek y Martin Pacchioni. Springer-Verlag, 1988.

EVOLUTION OF SIZE EFFECTS IN CHEMICAL DYNAMICS, Parte 2 en *Advances in Chemical Physics*, vol. 70. Dirigido por I. Prigogine y Stuart A. Rice. Wiley-Interscience, 1988.

THE CHEMICAL PHYSICS OF ATOMIC AND MOLECULAR CLUSTERS en *Proceedings of the CVII Course of the International School of Physics "Enrico Fermi"*, Varenna, vol. 289. Dirigido por Giacinto Scoles y S. Stringari. Societá Italiana di Fisica (en prensa).







5. SIMULACION POR ORDENADOR de las historias de la temperatura en función del tiempo, para agregados de 13 átomos de argón a diferentes energías constantes, que pone de manifiesto la coexistencia de agregados líquidos y sólidos. A baja energía (*arriba*) los agregados se comportan como sólidos; a alta energía (*centro*), como líquidos, y a una energía intermedia (*abajo*) los agregados se comportan como ambos, sólidos y líquidos. La temperatura de un agregado es directamente proporcional a su energía cinética. Cada punto representa 5×10^{-12} segundos.

Semillas dispersadas por hormigas

Miles de especies vegetales dependen de las hormigas para dispersar sus semillas. Con señuelos alimenticios y otras adaptaciones, la planta consigue que los insectos transporten las semillas sin dañarlas

Steven N. Handel y Andrew J. Beattie

Para distribuir sus semillas por doquier, las plantas recaban con frecuencia la ayuda de los animales. Algunas producen semillas que quedan pegadas temporalmente a los pelos de los mamíferos o a las plumas de las aves. Los árboles frutales y otras plantas poseen semillas que los animales frugívoros ingieren y que germinan tras su excreción o regurgitación. Pero los vertebrados no son los únicos animales que dispersan semillas; las hormigas también desempeñan un papel destacado.

Los biólogos han comenzado a descifrar los mecanismos especializados de las hormigas que las convierten en fuerza importante en la dispersión mundial de las plantas. La verdad es que las plantas dispersadas por semillas se encuentran en distintos hábitats de todos los continentes, salvo la Antártida. En la actualidad se conocen más de 3000 especies pertenecientes a más de 60 familias de plantas fanerógamas que se dispersan así. La lista crece día a día.

STEVEN N. HANDEL y ANDREW J. BEATTIE comparten un interés común por las interacciones entre plantas y animales. Handel, profesor adjunto en la Universidad de Rutgers y editor asociado de la revista *Evolution*, se doctoró por la Universidad de Cornell en 1976. Ha enseñado en Carolina del Sur y Yale, el Laboratorio Biológico de las Montañas Rocosas en Colorado y la Estación del Mountain Lake, de la Universidad de Virginia. De 1983 a 1985 presidió la sección de genética de la Sociedad Botánica de América. Beattie se convirtió en catedrático de la Universidad de Macquarie, en Sydney, en 1987. Había dirigido antes el departamento de ecología y biología evolutiva en la Universidad del Noroeste. También estuvo al frente del Laboratorio de las Montañas Rocosas.

Entre muchas plantas y las hormigas que transportan sus semillas existe un verdadero mutualismo, es decir, una relación de beneficio recíproco. Este mutualismo surgió de forma independiente en tantos grupos vegetales que debe haber presiones fuertes y de frecuente recurrencia que lo favorezcan. Aquí nos concentraremos en la selección natural y la evolución de este mutualismo y en sus ventajas ecológicas.

Las hormigas dispersan las semillas a través de dos mecanismos generales. Depende el primero de la actividad despilfarradora de las hormigas segadoras que recolectan grandes cantidades de semillas, las transportan a sus hormigueros y luego las comen. Algunas semillas caen o se pierden en el camino; otras, escondidas en el suelo, son posteriormente ignoradas por las hormigas obreras. Estas semillas pueden germinar y crecer en un nuevo lugar.

Puesto que las hormigas comen más semillas que las que dejan caer o extravían, este mecanismo de dispersión parece favorecer a los insectos mucho más que a las plantas, que pierden buena parte de sus semillas. Por ello, resulta más apropiado atribuir la dispersión de la sementera por hormigas segadoras a la depredación que al mutualismo. Su impacto se ve limitado principalmente a hábitats áridos.

El segundo mecanismo de dispersión, y el que nos interesa, difiere bastante del anterior y encierra un significado mucho más amplio. En él se ven implicadas plantas que producen un eleosoma, un cuerpo graso que se halla próximo a la semilla o está fijado a ella. Los eleosomas atraen a las hormigas, que se llevan al nido ambos, eleosoma y semilla. Allí, la colonia come los eleosomas y desecha, indemnes, las semillas.

Esta interacción no sacrifica ninguna semilla a la depredación por parte de las hormigas. Denominada mirmecocoria, del griego *myrmēx* (hormiga) y *kōrē* (dispersión), parece ser un mutualismo genuino; es decir, beneficia a la vez a las hormigas transportadoras y a las plantas que producen el eleosoma.

Los eleosomas han surgido repetidamente como cebos para las hormigas durante la evolución de diversas familias de plantas. Se encuentran comúnmente en los bosques húmedos de Norteamérica oriental y de Europa, en las comunidades arbustivas secas de Australia oriental y en comunidades vegetales del Africa austral.

Lo frecuente es que las hormigas dispersen sólo algunas especies de cada familia. Citemos, a modo de ejemplo, lo que ocurre en *Carex*; en este extenso género de las juncias, sólo unas pocas especies portan eleosomas de los que se ha demostrado que provocan la dispersión por hormigas. Muchas otras especies del mismo género son dispersadas por el agua o por vertebrados. De forma similar, en el género nemoral *Trillium*, de grandes flores, algunas especies poseen eleosomas en sus semillas y son dispersadas por hormigas, pero otras tienen frutos carnosos y son propagadas por vertebrados. Como ilus-

1. *TRILLIUM PETIOLATUM* ha evolucionado con una morfología distintiva que favorece que las hormigas dispersen sus semillas. La planta desarrolla su flor casi pegada al suelo, lo que permite que las hormigas lleguen fácilmente a las semillas. Como aliciente suplementario, las semillas presentan eleosomas, cuerpos grasos que las hormigas encuentran atractivos. Estas llevan las semillas portadoras de eleosomas a sus hormigueros, donde se comen los eleosomas y desechan las semillas, que luego podrán germinar.







2. *DICENTRA CUCULLARIA* (*fotografía de la izquierda*) es una planta de bosque que a finales de primavera libera las semillas portadoras de eleosomas, contenidas en vainas *(centro)*. Pueden verse cuatro semillas con eleosomas, junto con otras cuatro (*fotografía de la derecha*) tomadas del montón de basura de un hormiguero. Aunque sus eleosomas han sido comidos por las hormigas, las semillas germinan en el suelo rico en nutrientes.

tran estos ejemplos, extraídos de grupos filogenéticamente muy distintos, la dispersión de semillas por hormigas puede aparecer de forma independiente en el interior de un género.

La mirmecocoria fue estudiada de forma global por Johan Rutger Sernander. Este botánico de la Universidad de Uppsala publicó una monografía sobre las plantas mirmecócoras europeas en 1906. Su enfoque experimental y cuantitativo era notable, y su libro estableció la importancia de la mirmecocoria para gran parte de la vegetación europea. Sernander realizó una larga serie de experimentos de campo con muchas especies de plantas para demostrar que, cuando se les ofrecía varias semillas distintas, las hormigas preferían acarrear las dotadas de eleosomas.

Aunque la investigación de las mirmecócoras empezó en Europa, los botánicos no tardaron en explorar también la vegetación de otros continentes. Poco a poco fueron sumándose, a la lista de mirmecócoras conocidas, plantas americanas de ambos hemisferios. La mayoría de mirmecócoras de Europa y Norteamérica son hierbas que se encuentran en bosques húmedos y caducifolios. (Sernander descubrió esa correlación.) En Iberoamérica, hierbas, epífitos y lianas de la pluviselva tropical son dispersadas, a menudo, por hormigas.

Las mirmecócoras abundan, asimismo, en Australia y Africa austral, donde típicamente son arbustos de hojas duras que crecen en suelos áridos con pocos nutrientes. En 1975, Rolf Y. Berg, de la Universidad de Oslo, publicó sus hallazgos: aproximadamente 1500 especies de plantas australianas pertenecientes a 87 géneros eran dispersadas por hormigas. La vegetación *fynbos* de Sudáfrica contiene más de un millar de tales especies. Investigaciones que se están realizando actualmente en las regiones tropicales añadirán sin duda muchas más plantas a la lista.

La diversidad taxonómica de las plantas que tienen eleosomas se refleja en la amplia variedad de tejidos vegetales que la evolución ha modificado para formar cuerpos que atraen a las hormigas. En algunas especies, como *Dicentra cucullaria,* una sección del tejido de la cubierta de la semilla se ha expandido y se ha convertido en eleosoma. En otras, que incluyen las hepáticas que florecen en primavera, de Norteamérica oriental, el eleosoma deriva de una porción de la pared ovárica que rodea la semilla. Los eleosomas surgen del tejido de la bráctea que ciñe el ovario en especies de *Carex*. Se conocen otras estructuras de plantas con flores que se convierten en eleosomas.

Tomados en su conjunto, los diversos orígenes de los eleosomas constituyen un buen ejemplo de evolución convergente y nos demuestran que estructuras con formas y funciones distintas pueden moldearse de nuevo por la selección natural para que desempeñen el mismo papel ecológico. En el caso de los eleosomas, tejidos vegetales que en su origen protegían de los insectos herbívoros y otras amenazas se cambiaron bioquímica y estructuralmente en cebos alimenticios para las hormigas.

Los eleosomas están constituidos por células muy modificadas que contienen grandes vacuolas, o regiones rodeadas por membranas, llenas de una rica mezcla de nutrientes. Después de estudiar una amplia selección de mirmecócoras, Andreas Bresinsky, de la Universidad de Munich, señaló que los eleosomas poseían muchas grasas y ácidos grasos distintos, así como otros nutrientes comunes de los que requieren los animales. Estas sustancias podrían ser consumidas como alimento por las hormigas.

La mayoría de hormigas son animales omnívoros que comen insectos y otras partes animales y vegetales que encuentran en la superficie del suelo. Los eleosomas y las semillas a las que van fijados podrían remedar, en su química, a tejidos animales, para conseguir con tal engaño que las hormigas los recogieran.

Los eleosomas pueden contener también otras señales bioquímicas que desencadenan el comportamiento de recolección en las hormigas. Diane L. Marshall y sus colaboradores, de la Universidad de Nuevo México, identificaron un atractor en los eleosomas de la violeta europea, *Viola odorata*; se trata de una sustancia química específica, denominada 1,2 dioleína, un compuesto lipídico polar. Un lípido similar se ha descubierto en eleosomas de dos arbustos australianos, *Acacia myrtifolia* y *Tetratheca stenocarpa*.

Seguimos sin conocer el significado que estos compuestos químicos encierra para las hormigas, pero su aparición en mirmecócoras de lugares antípodas sugiere que ahí está operando la convergencia evolutiva. Lo que es más intrigante, esta similaridad conduce a la hipótesis siguiente: amén de la recolección de alimento, los eleosomas podrían desencadenar otros comportamientos innatos en las hormigas. En ese sentido, se sabe que, en algunas hormigas, el ácido oleico estimula la necroforesis, o comportamiento de transporte de cadáveres. Cabe pensar, pues, que los eleosomas que contengan esta sustancia sean acarreados por idéntica razón.

Además de los cuerpos alimentarios o eleosomas, las plantas mirmecócoras exhiben a veces otras adaptaciones morfológicas que facilitan la ubicación de las semillas cerca de las pistas de hormigas. En algunas especies, los tallos y los pedicelos de los frutos son delgados y débiles, y se doblan cuando las semillas están maduras. El espigamiento hace que las semillas se encuentren cerca del suelo o sobre el mismo, donde las hormigas recolectan.

En otras especies vegetales se asiste a una alteración más drástica de la morfología. Por ejemplo, *Carex umbellata,* una juncia estudiada por los autores, presenta un pedúnculo floral cortísimo, y las semillas y los tejidos que las rodean maduran cerca del suelo. Y así, en vez de crecer sobre largos tallos que se inclinan hacia el suelo a la madurez, las semillas permanecen cerca del nivel de recolección de las hormigas durante todo su desarrollo estacional.

La morfología de *Trillium petiolatum,* una flor silvestre del oeste de Norteamérica, está alterada de forma todavía más espectacular. La mayoría de especies de *Trillium* poseen una flor y tres hojas que crecen en el extremo de un largo tallo, que alcanza a veces los 30 centímetros de altura. Sin embargo, en *T. petiolatum* la flor, que es grande y vistosa, se forma muy cerca del suelo, y allí las semillas portadoras de eleosomas maduran y, con el tiempo, se exponen a las hormigas.

Además, las hojas de *Trillium* suelen crecer en verticilo bajo la flor, pero en *T. petiolatum* esta arquitectura pondría las hojas sobre el suelo del bosque. Aunque las hojas de *T. petiolatum* se originan en el lugar adecuado, bajo la flor, crecen en el extremo de largos pecíolos, que las elevan por encima de la flor en una posición más favorable para la fotosíntesis. En resumen, la estructura usual de un *Trillium* se ha invertido. La explicación evolutiva razonable de la forma de *T. petiolatum* debe residir en las notables ventajas de la diseminación de semillas por parte de las hormigas.

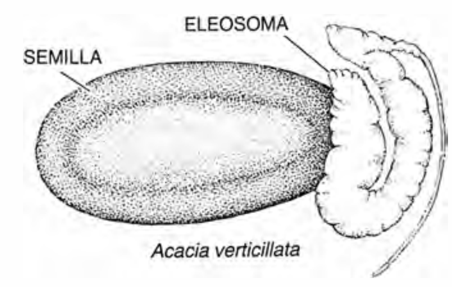
Para facilitar tal dispersión, las mirmecócoras podrían asimismo haber alterado las épocas en las que sus semillas maduran. En los climas templados, por ejemplo, la mayoría de mirmecócoras tienen semillas y eleosomas que maduran a principios de primavera. Los cadáveres de insectos, principal recurso alimentario de las hormigas, no abundan entonces como en verano, después de que las poblaciones de insectos han crecido. Por tanto, las plantas que presentan eleosomas maduros en primavera se encontrarán con menos competencia en cuanto a la atención de las hormigas que recolectan alimento, y sus semillas podrán ser transportadas con más frecuencia que las semillas que aparecen en verano u otoño.

La selección natural de la maduración temprana de semillas y eleosomas explicaría así el predominio de mirmecócoras vernales. Desde luego, hay otros factores que pueden favorecer la elevada actividad metabólica de las hierbas nemorales en primavera, como la disponibilidad de luz sobre el suelo del bosque antes de que a los árboles de la bóveda les salgan las hojas. La economía de la recolección de alimento por parte de las hormigas puede ser sólo una presión de selección adicional que refuerce el desarrollo de las mirmecócoras a principios de la primavera.

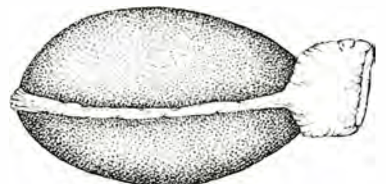
Las hormigas que recolectan las semillas de las plantas mirmecócoras forman un conjunto muy diverso. Muchas de ellas se hallan adaptadas a una existencia fundamentalmente carnívora. A este propósito, Carol C. Horvitz, de la Universidad de Miami, ha demostrado que en el sur de México las hormigas que transportan las semillas de *Calathea* pertenecen a los géneros *Odontomachus* y *Pachycondyla,* dotados de potentes aguijones y grandes mandíbulas para someter a sus presas. A pesar de ello, las hormigas recolectan con ahínco las semillas y las llevan al hormiguero, donde extraen los eleosomas y se los ofrecen en comida a las larvas. Quizás hay sustancias químicas en los eleosomas que estimulan a las hormigas del mismo modo que lo haría la presa.

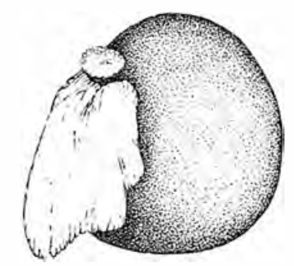
Otros muchos géneros de hormigas dispersan semillas: *Formica, Myrmica* y *Aphaenogaster* suelen hacerlo en los

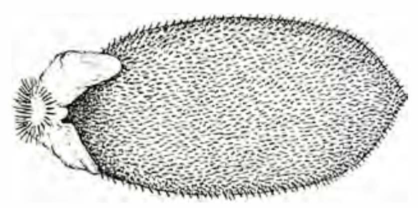
ALGUNAS SEMILLAS CON ELEOSOMAS

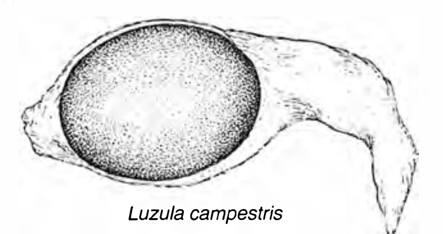


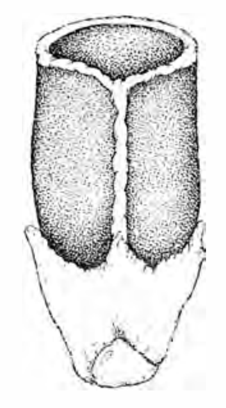
Acacia verticillata


Viola nuttallii


Corydalis aurea


Polygala vulgaris


Luzula campestris


Lamium album

bosques templados de Europa y Norteamérica; las especies de *Rhytidoponera, Pheidole* e *Iridomyrmex* priman en la vegetación esteparia del sudeste de Australia. Incluso a géneros granívoros como *Messor, Pogonomyrmex* y *Veromessor,* que por lo general comen semillas, se les ha descubierto una actividad diseminadora en determinadas circunstancias.

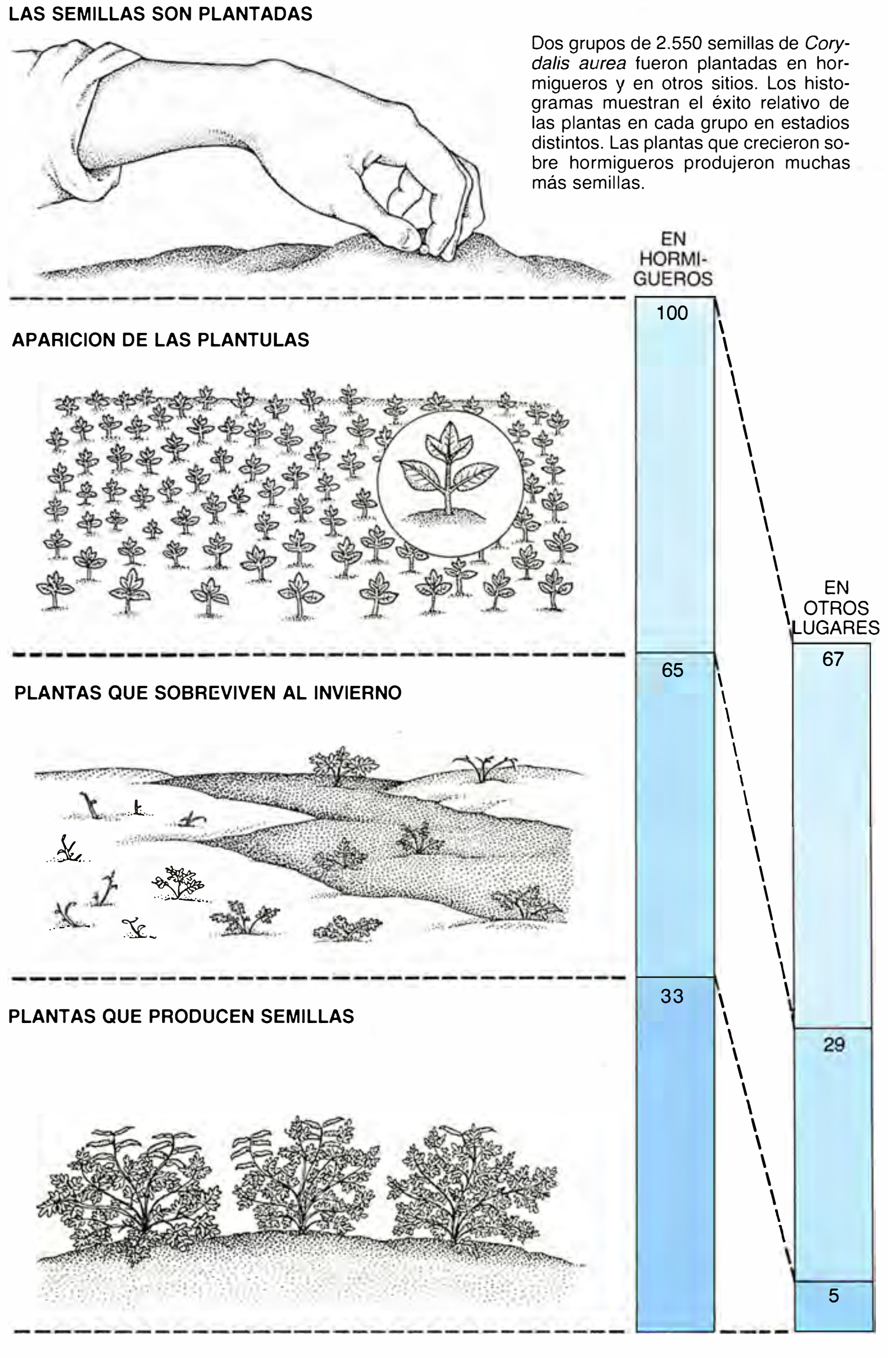
Desde la óptica de la estrategia, tiene sentido que la mirmecocoria procure englobar a cuantas especies de hormigas sea posible. En una región determinada suele haber muchas especies distintas, y una planta que evolucionara para atraer a una sola de ellas se encontraría probablemente en desventaja. De hecho, de las miles de especies vegetales mirmecócoras conocidas, no se ha demostrado que ni una sola se base en una única especie de hormiga.

Del mismo modo, tampoco hay pruebas de que una especie de hormiga haya evolucionado para sacar partido de una mirmecócora en particular. Esta falta de especialización contrasta con las muchas relaciones específicas de especie que se dan entre insectos y plantas y que han sido observadas en los trópicos, donde tales interacciones revisten interés para la polinización.

Por ello, el fenómeno de la mirmecocoria se explica mejor considerándolo resultado de la evolución de las plantas, no de la coevolución de una planta y un insecto. Para el mundo de las hormigas, un eleosoma puede ser simplemente otra carga de nutrientes que acarrear hasta el nido.

¿Por qué se han escogido las hormigas para dispersar las semillas? Hay muchos grupos más de insectos en los hábitats de las mirmecócoras. Ahora bien, la diseminación eficaz requiere un insecto que desplace las semillas a una distancia significativa y no las dañe. Sólo los insectos sociales, que transportan la comida a sus nidos en vez de consumirla en el lugar de recolección, cumplen ambos requisitos. Las obreras suelen buscar comida en la zona circundante al nido y luego transportan el alimento al hormiguero para aprovisionar a sus larvas. Por ello, la evolución del comportamiento social en las hormigas las ha preadaptado, o predispuesto, para convertirse en eficaces dispersadoras de sementera.

VENTAJAS DE CRECER EN HORMIGUEROS



Dos grupos de 2.550 semillas de *Corydalis aurea* fueron plantadas en hormigueros y en otros sitios. Los histogramas muestran el éxito relativo de las plantas en cada grupo en estadios distintos. Las plantas que crecieron sobre hormigueros produjeron muchas más semillas.

Las hormigas poseen además otras características que aumentaron la probabilidad de que la selección primara su función diseminadora. Se cuentan entre los insectos más abundantes de la mayoría de hábitats. Recolectan bien en la superficie del suelo durante la larga estación de crecimiento de las plantas. Cuando las hormigas encuentran nuevos recursos alimentarios, reclutan obreras para recolectar la mayor cantidad posible. Desplazarán incluso sus nidos enteros hacia las zonas que prometan alimento abundante. Todos estos comportamientos benefician a las plantas mirmecócoras cuyas semillas son dispersadas.

Por el hecho de que la mirmecocoria se da en hábitats muy dispares, los ecólogos se han planteado la posibilidad de formular generalizaciones



3. HORMIGAS OBRERAS de la especie *Aphaeonogaster rudis* transportan larvas hasta las semillas de *Sanguinaria canadensis,* para que puedan comerse los eleosomas. Se desconoce qué ventajas especiales ofrecen los eleosomas en la dieta de las hormigas. (Fotografía de Steven A. Handel.)

sobre las ventajas evolutivas de este fenómeno para las plantas. Sólo recientemente una serie de experimentos de campo y de laboratorio ha descubierto de qué modo la capacidad de las semillas de atraer a hormigas transportadoras puede aumentar la supervivencia y la fecundidad de las especies vegetales.

Un beneficio fundamental de la diseminación por hormigas reside en la expansión del área de distribución de una planta. Con frecuencia se ha observado a esos artrópodos transportando semillas a uno o dos metros de distancia, pero también se han registrado recorridos de 70 metros. Por consiguiente, las hormigas facilitan que las plantas colonicen nuevas áreas. Al dispersar su población, una especie vegetal reduce el riesgo de extinción por cambios locales en los hábitats. Cualquier especie de hormiga, independientemente de sus hábitos de anidamiento, puede conferir este beneficio.

Aumentan, asimismo, las probabilidades de supervivencia de una semilla al transportarla lejos de la planta madre, que podría dar sombra e inhibir el crecimiento de la plántula. En un experimento realizado por uno de nosotros (Handel), se dejaron semillas de la juncia *Carex pedunculata* bajo la planta madre y crecieron pimpollos de sólo tres hojas. Durante el mismo período, plántulas de semillas que habían sido desplazadas de su planta madre crecieron y produjeron una media de 89 hojas. Además, las semillas transportadas mostraron, con mucho, mayor fecundidad: sólo ellas produjeron plantas que florecieron el verano siguiente.

Además de ayudar a minimizar la competencia entre las plántulas y las plantas madre, el movimiento de las semillas por parte de las hormigas puede relajar también la competencia entre distintas especies de plantas. En ese sentido, uno de nosotros (Handel) realizó experimentos con tres especies de *Carex,* de las que sólo una era mirmecócora, que crecían en el mismo hábitat. La mirmecócora no crecía bien en presencia de las demás; pero medraba si estaba sola.

Puesto que las hormigas locales sólo estaban interesadas en las semillas con eleosomas, aislaban en sus nidos las semillas de la planta mirmecócora. Con ello la mirmecócora podía monopolizar determinados lugares del hábitat donde menudeaban los hormigueros; verbigracia, madera en putrefacción. Las plantas no tenían que competir con los pimpollos de otras especies de *Carex* por el espacio, la luz, los nutrientes y demás recursos. La mirmecocoria se tornaba eficaz en presencia de otros muchos géneros cuyas plántulas competían por lugares donde desarrollarse.

Más que la competencia incluso, la depredación constituye una causa principal de agotamiento en semillas y pimpollos. Muchos animales, entre ellos aves y pequeños roedores, se alimentan, sobre todo, de semillas. Y cualquier jardinero sabe que limacos y caracoles anuncian la muerte de las plántulas.

Determinadas investigaciones realizadas en distintas partes del mundo se han centrado en la posibilidad de que las semillas introducidas en los hormigueros eviten al menos algunos depredadores. Las desarrolladas en los bosques de Virginia occidental y en los prados subalpinos de Colorado revelaron que las semillas colocadas en pequeñas áreas de las que se habían excluido hormigas eran comidas de forma casi invariable a las 24 horas. Por contra, cuando había hormigas, las semillas con eleosomas eran llevadas rápidamente bajo tierra. En el caso de *Viola nuttallii* en Colorado, Christine Turnbull, de la Universidad de Macquarie, demostró que la liberación estacional y diaria de semillas coincidía con el máximo nivel de actividad de las hormigas.

Australia puede ofrecer un ejemplo especialmente sugestivo de evitación de depredación. En los brezales y bosques australianos, donde la vege-



4. LOS MADEROS EN PUTREFACCION suelen albergar hormigueros. Las plantas que crecen sobre el leño que se ilustra arriba proceden de semillas aportadas al homiguero. La mayoría de plantas visibles son juncias de la especie *Carex pedunculata,* pero también hay violetas y hepáticas.

tación está dominada por matorrales esclerófilos (de hojas duras), abundan las especies mirmecócoras; también los depredadores. Curiosamente, las principales especies depredadoras son hormigas. Investigaciones recientes de Lesley Hughes, de la Universidad de Macquarie, sugieren que las semillas liberadas en este ambiente esperan a los ganadores de una "carrera" entre las especies de hormigas beneficiosas, que dispersan las semillas, y las especies perjudiciales, que se las comen. La suerte de la semilla depende de quién llegue antes. Un eleosoma aumenta la probabilidad de que la hormiga diseminadora encuentre la semilla antes que la depredadora.

Los incendios constituyen otra amenaza, de manera particular en la vegetación dominada por matorral de Australia y Africa austral. Pero las adaptaciones para sobrevivir al fuego son comunes en estas plantas. Muchas especies, así algunas mirmecócoras, no se limitan a resistir al fuego, sino que dependen del mismo para fomentar su reproducción.

Los estudios realizados por varios investigadores australianos abonan la idea según la cual el transporte de semillas hasta los hormigueros las protege del calor letal de los fuegos del matorral. Pero, paradójicamente, algunas semillas dispersadas por hormigas no pueden germinar, a menos que se hallen expuestas a niveles inferiores de calor, no letales. Las excavaciones de hormigueros han revelado que las semillas se entierran en distintos niveles. Esta disposición podría resultar ventajosa para las plantas, al permitir que algunas semillas al menos estén a la profundidad necesaria para quedar a salvo del calor peligroso y, también, suficientemente caldeadas para germinar.

A diferencia de las aves y los mamíferos, que dispersan ampliamente por el hábitat las semillas que recogen, las hormigas llevan las semillas hasta colonias cuidadosamente situadas, otra pauta de comportamiento que ayuda a la supervivencia de las semillas. Por ejemplo, en bosques moderadamente húmedos, las hormigas suelen hacer nido en troncos y tocones en putrefacción que se encuentran elevados sobre el suelo. Estos lugares son menos susceptibles de inundarse en la primavera, lo que los hace atractivos tanto para las hormigas como para las semillas.

Las colonias de hormigas, como todas las demás sociedades animales y humanas, tienden a acumular desechos. Sus montones de basura contienen restos de presas, materia fecal, cadáveres de hormigas y multitud de otras cosas (muchas de ellas sin utilidad aparente) que recolectan y acarrean a casa. Las semillas y los pimpollos que germinan, en particular los de las mirmecócoras, pueden beneficiarse si terminan en estos basureros.

Los residuos orgánicos suelen poseer niveles altos de nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, que es la razón por la cual los jardineros mantienen montones de mantillo y los granjeros esparcen estiércol en sus campos. Los niveles de materia orgánica, nitrógeno, potasio y fósforo son con frecuencia mayores en los hormigueros que en los suelos circundantes. Por ello, los desechos de las colonias de hormigas pueden proporcionar una reserva escondida, pequeña pero ya preparada, de abono para los pimpollos, que los nutre durante sus delicados estadios iniciales.

Otras características físicas del suelo en los hormigueros y alrededores pueden asimismo aumentar la supervivencia de las plántulas. La construcción del hormiguero ha hecho desmenuzable el suelo y facilitado su aireación; robustece también su capacidad hídrica. Algunos investigadores sospechan ya que el beneficio fundamental que proporcionan muchos nidos es el de garantizar un modesto suministro de agua para una plántula hasta que sus raíces se alarguen lo suficiente para encontrar agua por sí solas.

Resulta, pues, evidente, que las hormigas afectan profundamente las condiciones ecológicas para el crecimiento de las semillas. Para investigar la incidencia de la mirmecocoria en la evolución, algunos estudiosos han seguido la suerte de las semillas en experimentos de campo. Con ese fin se comparan dos cohortes de semillas, una de las cuales ha sido transportada por hormigas hasta su nido y la otra se ha plantado a mano, aleatoriamente, en el mismo hábitat general. Ejemplo de un experimento de este tipo fue un estudio pionero de dos especies mirmecócoras de violetas en el sur de Inglaterra. Demostró que, transcurridos tres años, cuando las semillas germinaron y aparecieron los plantones, los únicos supervivientes eran los de la cohorte manipulada por las hormigas.

Más reciente es el estudio realizado con una fumaria, *Corydalis aurea*; esta planta bianual produce semillas en su segundo año. Frances M. Hanzawa, del Grinnell College, descubrió que las tasas de supervivencia no diferían entre los pimpollos germinados en hormigueros y los brotados en otro contexto. Pero sobrevivían al invierno más plántulas procedentes de los hormigueros, desarrollándose en adultos reproductores. Había, pues, una diferencia sorprendente en el número total de semillas para una segunda generación producido por las dos cohortes: las plantas manipuladas por las hormigas rendían el doble que las plantas de control.

Habida cuenta de que las dos cohortes empezaron con el mismo número de semillas en sus primeras generaciones, es evidente que una población de *Corydalis aurea* usada por

las hormigas crecerá mucho más deprisa que otra que no lo haya sido. Y una población que crece rápidamente tiene mayor probabilidad de competir con otras plantas por nutrientes, espacio y demás recursos. Por tanto, el estudio de Hanzawa mostró que las condiciones ecológicas para la diseminación, como la disponibilidad de hormigas, afectaba al potencial evolutivo de las poblaciones vegetales.

Queda así puesto de manifiesto que la mirmecocoria supone muchas ventajas para ciertas especies de plantas. Desconocemos, empero, de qué modo las hormigas sacan partido de esta interacción. Sabemos que los eleosomas son buscados ávidamente por las recolectoras, arrancados rápidamente de las semillas y ofrecidos a las larvas. Debe todavía cuantificarse en qué medida este comportamiento afecta a las tasas de crecimiento de las colonias de hormigas.

Vale también la pena señalar que no todas las hormigas se dedican a la diseminación. Cuando una planta libera sus semillas, sólo un pequeño subconjunto de las especies de hormigas de un hábitat determinado demuestra interés por los eleosomas. En estas hormigas debe presentarse algún tipo de especialización, pero nadie sabe si es de comportamiento, morfológica, dietaria u otra.

La dispersión de semillas por las hormigas constituye, pues, un modelo importante para el estudio de una amplia variedad de interacciones entre plantas y animales que, en cierto sentido, se manifiestan asimétricas. Las plantas se han adaptado claramente a las interacciones con las hormigas (los eleosomas son sus rasgos adaptativos más palmarios); mucho menos obvias resultan las adaptaciones desarrolladas por las hormigas.

En cuanto sistema de dispersión para las semillas, la mirmecocoria, aunque bueno, no es infalible. Un eleosoma constituye un premio atractivo para distintos tipos de hormigas. Los experimentos con *Corydalis aurea* demostraron que de los nidos de determinadas especies de hormigas no germinaron nunca plantones. Efectivamente, estas hormigas parecen ser "ladronas de eleosomas" parásitas, que destruirían las semillas o plantones fijados.

Aparte de estas hormigas ladronas, una docena de otros factores de cualquier hábitat contribuyen al éxito o al fracaso de la mirmecocoria en tanto que mecanismo de dispersión de semillas. La lluvia inunda los hormigueros, y las colonias de hormigas están expuestas a epidemias de enfermedades fúngicas o a una depredación elevada. Si abundan otros recursos alimentarios, los eleosomas podrían encerrar menor atractivo para las hormigas. Si las plantas compiten por la atención de las hormigas, podrían desecharse las semillas con los eleosomas más pequeños.

Puesto que el éxito de la diseminación por hormigas puede variar considerablemente, Hall Cushman, de Macquarie, y John F. Addicott, de la Universidad de Alberta, han sugerido que la mirmecocoria es un mutualismo condicional. En un momento y lugar determinados, dependiendo de las condiciones imperantes, la interacción podría funcionar de manera subóptima. Sin embargo, cuando todas las condiciones son adecuadas, las ventajas de la mirmecocoria, tanto para las plantas como para las hormigas, son muy notables. Ventajas cuyo valor refuerza poderosamente las presiones que mantienen los rasgos que hacen posible el comportamiento.

A medida que aumente la lista de mirmecócoras conocidas, los biólogos irán conociendo mejor la importancia de este mecanismo de dispersión de sementera en todo el mundo. Nuevos estudios de los beneficios de la mirmecocoria para las plantas y las hormigas ayudarán, asimismo, a dilucidar los pormenores de las relaciones mutualistas y de sus consecuencias evolutivas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MYRMECOCHOROUS PLANTS IN AUSTRALIA AND THEIR DISPERSAL BY ANTS. Rolf Y. Berg en *Australian Journal of Botany,* vol. 23, n.° 3, págs. 475-508; junio de 1975.

DISPERSAL ECOLOGY OF *CAREX PEDUNCULATA* (CYPERACEAE): A NEW NORTH AMERICAN MYRMECOCHORE. Steven N. Handel en *American Journal of Botany,* vol. 63, n.° 8, págs. 1071-1079; septiembre de 1976.

THE COMPETITIVE RELATIONSHIP OF THREE WOODLAND SEDGES AND ITS BEARING ON THE EVOLUTION OF ANT-DISPERSAL OF *CAREX PEDUNCULATA*. Steven N. Handel en *Evolution,* vol. 32, n.° 1, págs. 151-163; marzo de 1978.

THE EVOLUTIONARY ECOLOGY OF ANT-PLANT MUTUALISMS. Andrew J. Beattie. Cambridge University Press, 1985.

SEED ECOLOGY. M. Fenner, Routledge, Chapman & Hall, Inc., 1985.

DIRECTED DISPERSAL: DEMOGRAPHIC ANALYSIS OF AN ANT-SEED MUTUALISM. Frances M. Hanzawa, Andrew J. Beattie y David C. Culver en *American Naturalist,* vol. 131, n.° 1, págs. 1-13; enero de 1988.

Anticuerpos monoclonales de segunda generación

Elementos esenciales para el diagnóstico y la terapia de enfermedades agudas y crónicas, se han convertido en poderosa herramienta de la investigación básica. ¿Cómo preparar las células que los segreguen?

Jorge V. Gavilondo Cowley

En la inmunología básica y aplicada se venía trabajando, desde el siglo pasado, con anticuerpos policlonales producidos mediante la inyección de un determinado antígeno en un animal para, una vez inmunizado éste, obtener las inmunoglobulinas deseadas. Pero el carácter agotable y heterogéneo de estas preparaciones de anticuerpos impedía conseguir la repetición exacta y lograr la sensibilidad que se demandan en muchas aplicaciones de laboratorio, diagnósticas y terapéuticas.

En 1975, Georges Köhler y César Milstein, del laboratorio de biología molecular de la Universidad de Cambridge, idearon la forma de cultivar de manera continua células productoras de anticuerpos. Para ello, hibridaron linfocitos *B* inmunes de ratón con células tumorales de igual origen (mielomas), adaptadas previamente al crecimiento *in vitro*. Los hibridomas formados por la fusión de ambas células heredan, de los linfocitos *B* parentales, la producción de anticuerpos específicos; de los mielomas, la capacidad para la propagación indefinida en cultivo, amén del fenotipo para una gran secreción de inmunoglobulinas. Un clon de hibridomas, esto es, un cultivo originado por la reproducción de una sola de estas células híbridas, secreta anticuerpos monoclonales (AM) de una única especificidad.

Merced a su especificidad exclusivista, su reproducción lote a lote y su fabricación en masa, los AM han ido complementando o sustituyendo las preparaciones de anticuerpos policlonales en la investigación, el diagnóstico, la terapéutica y algunos procesos industriales. Existen hoy en día más de 500 compañías y organizaciones dedicadas a la investigación, el desarrollo, la fabricación y la comercialización de anticuerpos monoclonales, que mueven cifras de miles de millones de dólares. Se habla ya de una veintena de plantas con capacidad de producción de 1 a 100 kilogramos de AM por año.

Aquí, repasaremos los procedimientos seguidos en la creación de células secretoras de AM con una especificidad predeterminada y nos detendremos en algunas técnicas nuevas que han dado origen a los llamados anticuerpos monoclonales de segunda generación: los anticuerpos bifuncionales y los anticuerpos y fragmentos de anticuerpos producidos por ingeniería genética.

¿En qué consiste la generación de hibridomas por fusión celular? En la mayoría de los laboratorios del mundo, los AM se producen a partir de hibridomas generados por la fusión de linfocitos y mielomas de ratón o rata. La selección de estas especies obedece a su amplio repertorio de respuesta de anticuerpos y a la existencia de mielomas bien adaptados al cultivo y que no secretan inmunoglobulinas propias, factor este importante porque conviene, lógicamente, que los hibridomas resultantes produzcan sólo el anticuerpo específico del linfocito parental.

El proceso de obtención de AM comienza con la inmunización contra el antígeno de interés. Existen muchos protocolos y técnicas de inmunización, cuya elección depende de la inmunogenicidad del antígeno, la clase particular de anticuerpo que se desea (independientemente de qué antígeno reconozcan, el organismo produce anticuerpos de diferente clase —isotipo— según la función que éstos deban realizar) y de la región específica de la molécula del antígeno (determinante antigénico) contra la que se deseen producir AM.

La fuente fundamental de linfocitos en los roedores es el bazo, por su contenido de células *B*. Si bien la inmunización directa del animal, mediante la inyección repetida del antígeno, es la forma habitual para sensibilizar específicamente a los linfocitos *B*, se han desarrollado recientemente procedimientos de inmunización *in vitro*. Para ello, el antígeno se coloca en un medio de cultivo y se agregan los linfocitos extraídos de animales vírgenes (inmunización primaria) o inyectados (inmunización secundaria).

La inmunización *in vitro* reduce considerablemente el tiempo del proceso y las cantidades necesarias de antígeno, además de permitir la producción de anticuerpos contra moléculas susceptibles de supresión o tolerancia *in vivo*. Es útil también para obtener AM contra moléculas que guardan una alta homología estructural en el humano y los múridos. En nuestro laboratorio hemos empleado con éxito la inmunización primaria en cultivo de linfocitos de ratón para generar AM contra el factor de crecimiento epidérmico humano recombinante, cuya homología de secuencia de aminoácidos con la molécula murina es superior al 70 por ciento. Para llegar a resultados similares empleando inmunizaciones *in vivo*, las cantidades de antígeno que consumimos fueron 100 veces superiores.

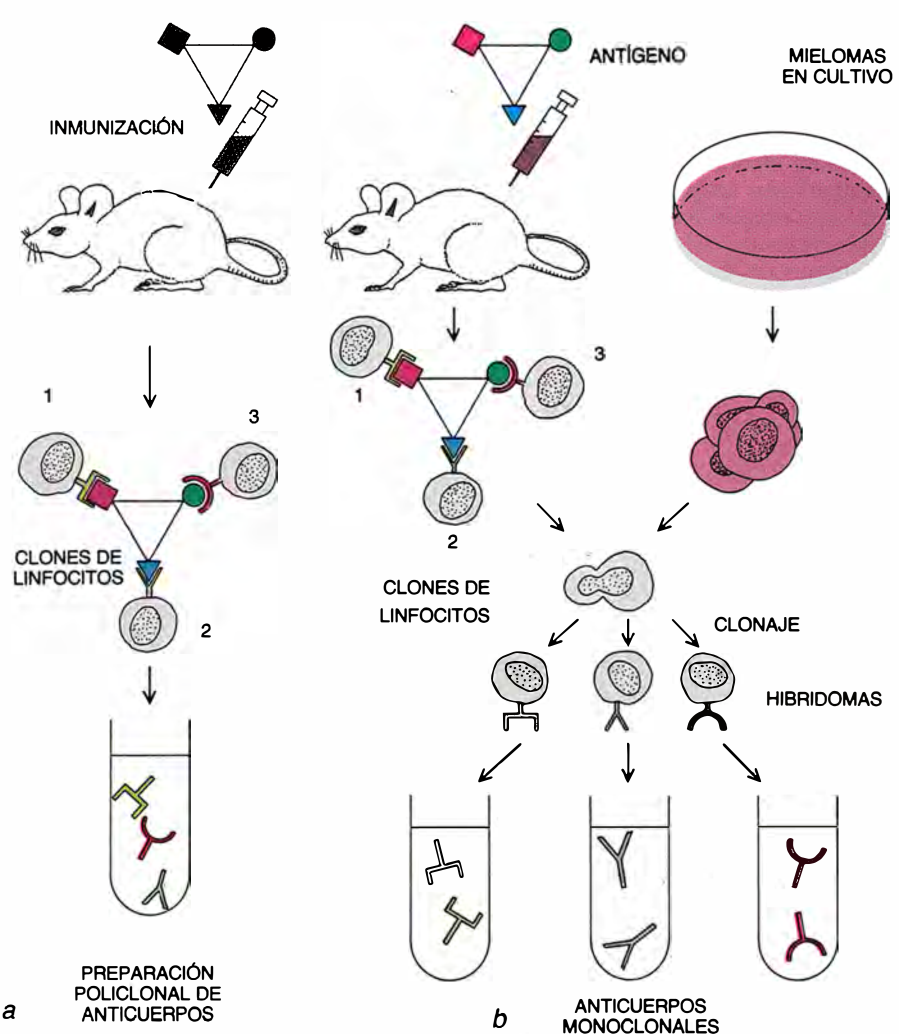
JORGE V. GAVILONDO COWLEY dirige, desde 1988, la división de hibridomas y modelos animales del Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología de La Habana. Comenzó su formación en la universidad de ésta y la prosiguió en el Instituto de Ciencias Nucleares de Belgrado y en el Instituto Pasteur de París. Gavilondo constituye un modelo de investigador para los científicos de países de recursos medios.

Una vez sensibilizados, los linfocitos se hibridan con mielomas en una solución de polietilenglicol, que aglutina las células y actúa sobre las membranas, aumentando la probabilidad de fusión. Las células recién fundidas se dispersan en las excavaciones múltiples de placas de cultivo especiales, empleando un medio selectivo donde sólo sobreviven y proliferan los híbridos linfocito-mieloma. Este efecto selectivo se produce debido a que los mielomas usados en estos procedimientos son deficientes en hipoxantina guanina fosforribosil transferasa (HGPRT), enzima que permite que las células utilicen hipoxantina extracelular como fuente para fabricar las purinas (citosina y adenina) necesarias para la replicación del ADN, en los casos en que la vía endógena normal de síntesis de nucleótidos se encuentre bloqueada.

Aprovechando esa característica del mieloma parental, se añade hipoxantina al medio de cultivo donde se siembran las células fundidas; se agrega también un agente bloqueador de la vía endógena (por ejemplo, aminopterina) y timidina, que servirá de fuente de pirimidinas (timina y guanina). Las células tumorales no fundidas y los híbridos mieloma-mieloma, que no sintetizan la HGPRT, perecerán por su incapacidad de emplear la hipoxantina para la formación de ADN; sólo sobreviven y proliferan los hibridomas, a los cuales el linfocito parental aportó el gen para esta enzima. Los linfocitos que no se hibridaron con el mieloma son incapaces de sobrevivir en el cultivo más allá de los 10 días.

Una vez que las colonias de hibridomas cubren buena parte del área posible de crecimiento, se pasa al ensayo del medio de cultivo metabolizado para detectar la presencia de los anticuerpos deseados. Las técnicas de tamizaje más empleadas, por ejemplo, el ensayo inmunoenzimático de fase sólida, el radioinmunoensayo y la fluorescencia, conjugan una alta sensibilidad con la rapidez en los resultados y la posibilidad de estudiar muchas muestras de manera simultánea. (En un experimento corriente de fusión se pueden obtener unos 1000 cultivos independientes de hibridomas.)

Por último, los cultivos que secretan anticuerpos con las características requeridas se clonan repetidamente, para asegurar el origen monoclonal de la línea celular resultante y, por tanto, de las inmunoglobulinas producidas. Los clones de hibridomas se expanden en cultivo para su conservación mediante congelación y para la producción de AM.



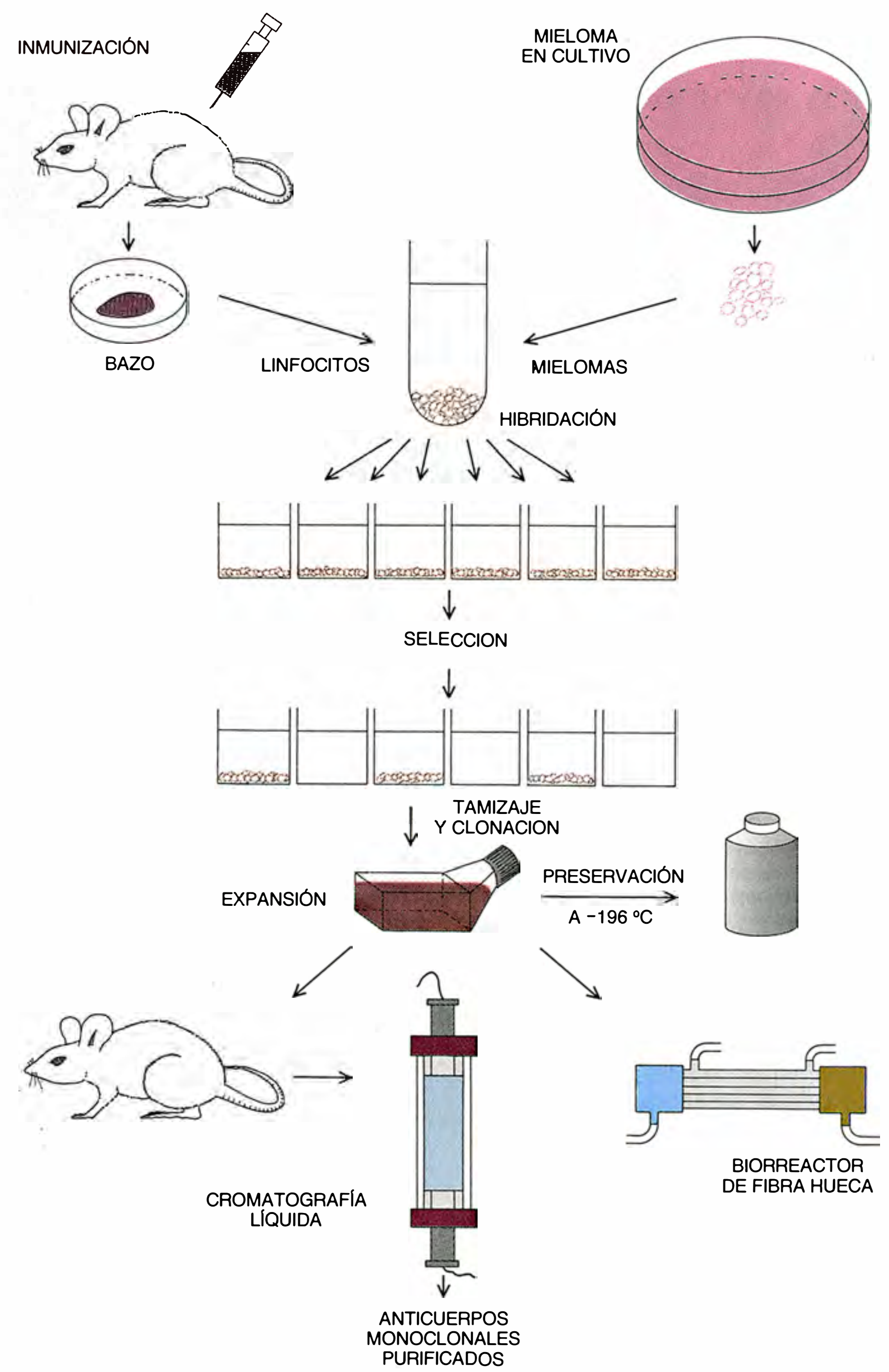
1. CARACTERISTICAS PRINCIPALES de los procesos que llevan a la obtención de preparaciones policlonales de anticuerpos y a anticuerpos monoclonales. En (*a*) se observa cómo varios clones particulares de linfocitos *B* de un ratón responden ante el estímulo de la inmunización y producen anticuerpos con afinidad y clase diferentes, que reconocen distintos determinantes del antígeno. La sangre del animal contiene una mezcla policlonal, heterogénea, de anticuerpos específicos. En (*b*) se compara el proceso anterior con la obtención de anticuerpos monoclonales, que comienza de manera similar, sólo que los linfocitos del ratón inmunizado se hibridan por fusión con mielomas, para lograr su propagación indefinida en cultivo; luego, estas mezclas de hibridomas se someten a clonaciones que "individualizan" diferentes líneas de células secretoras de anticuerpos idénticos: monoclonales.

La técnica de obtención de células secretoras de AM ha estado vinculada desde un inicio a los trabajos de producción de los anticuerpos para satisfacer su gran demanda. Los AM se generan a partir del sobrenadante de los cultivos de hibridomas o del fluido ascítico que acompaña a la propagación de esas células fundidas en la cavidad peritoneal de animales compatibles o inmunodeprimidos.

Se ha demostrado que la inoculación intraperitoneal de ratas y ratones con aceite mineral, sus derivados y otras sustancias estimulantes de las células reticuloendoteliales facilita que los hibridomas que se trasplanten por esta misma ruta formen tumores ascíticos de apreciable volumen. El ascitis contiene concentraciones de inmunoglobulinas monoclonales que centuplican las que se obtienen en el sobrenadante de los cultivos normales; durante mucho tiempo, estos procedimientos *in vivo* constituyeron la base de la producción de AM.

No obstante, las exigencias de cantidad y calidad que han generado el diagnóstico *in vivo* y la terapéutica con anticuerpos monoclonales han impulsado el desarrollo de métodos alternativos de producción, basados en el cultivo de hibridomas a gran escala. Los nuevos sistemas de cultivo, muy eficaces, se basan en el uso de biorreactores automatizados donde los hibridomas crecen en suspensión, inmovilizados en cartuchos de fibras huecas o de cerámica, en microsferas porosas, o microencapsulados en geles biocompatibles. Condiciones todas ellas que facilitan la producción industrial de AM por decenas o cientos de kilogramos al año.

No menos importante ha sido el desarrollo de los procedimientos para la purificación de los AM, que dependen de las características del anticuerpo y el uso al que esté destinado. Para la elaboración de matrices con anticuerpos acoplados y destinadas a la inmunopurificación experimental de antígenos, así como para muchos sistemas de diagnóstico *in vitro*, son suficientes purezas electroforéticas entre el 50 y el 75 por ciento; en cambio, para la preparación de anticuerpos conjugados y el uso *in vivo* de AM o de productos purificados con AM, se requieren niveles entre 95 y 99 por ciento, además de otras características (ausencia de ADN, de virus murinos, pirógenos y de otros agentes). Desde el punto de vista de los principios cromatográficos empleados para alcanzar tales niveles, los más socorridos son: el intercambio iónico, la afinidad, la adsorción, la hidrofobicidad y el tamiz molecular.



2. TECNICA TRADICIONAL DE OBTENCION DE HIBRIDOMAS SECRETORES de anticuerpos monoclonales. Los linfocitos del bazo del animal inmunizado se hibridan con mielomas, en presencia de una solución de polietilenglicol. Las células recién fundidas se siembran en placas multi-pozos, en presencia de un medio de cultivo selectivo donde sólo sobreviven y proliferan los hibridomas. Los sobrenadantes de estos microcultivos de hibridomas se ensayan para detectar la presencia del anticuerpo con las características deseadas y las células en cuestión se clonan repetidamente. El clon de hibridomas secretor de anticuerpos monoclonales se expande en cultivo para la congelación del mismo y la producción de los anticuerpos, ya sea mediante su propagación en la cavidad peritoneal de ratones inmunocompatibles, ya sea en biorreactores. Las preparaciones crudas de anticuerpos monoclonales obtenidas de estas fuentes se purifican por los métodos cromatográficos habituales.

Los trabajos para generar anticuerpos monoclonales humanos (AMH) están motivados, principalmente, por la necesidad de sustituir o reforzar las fracciones globulínicas de uso rutinario, tendencia ésta que se verá acentuada con la preocupación creciente por la contaminación de las preparaciones convencionales de anticuerpos humanos mediante agentes infecciosos (virus de la hepatitis, virus de las inmunodeficiencias humanas, citomegalovirus y demás).

Por otro lado, el uso directo de anticuerpos monoclonales murinos (AMM) para el diagnóstico *in vivo* y la terapéutica en el hombre ha demostrado que aproximadamente en la mitad de los pacientes se produce una respuesta contra estas inmunoglobulinas. A pesar de que se ha hablado de que tal respuesta podría resultar, en principio, beneficiosa en algunos casos de cáncer (gracias a la eventual formación de anticuerpos que reproduzcan las estructuras inmunogénicas del antígeno tumoral: anticuerpos antiidiotípicos), la reacción antirratón o antirrata puede constituir un factor limitante objetivo de la eficacia y utilidad terapéutica de los AMM, de manera particular en aquellas situaciones donde fuera necesario elevar las dosis y dilatar o repetir el tratamiento. También, la presencia de hidratos de carbono específicos en los anticuerpos humanos y su mayor vida biológica son razones a favor de que los AMH puedan mediar mejor en el hombre distintas funciones efectoras.

Por último, los AMH permitirían la disección de las particularidades de la respuesta inmune humoral humana y el reconocimiento de ciertos aspectos de la estructura antigénica no percibidos por otras especies.

A pesar de todos estos incentivos existen aún enormes diferencias en la difusión de los AMH como productos de uso práctico y rutinario, cuando se comparan con los AMM; fenómeno que guarda relación directa con la posibilidad real de generar líneas secretoras de AMH. Veamos en más detalle algunos elementos al respecto.

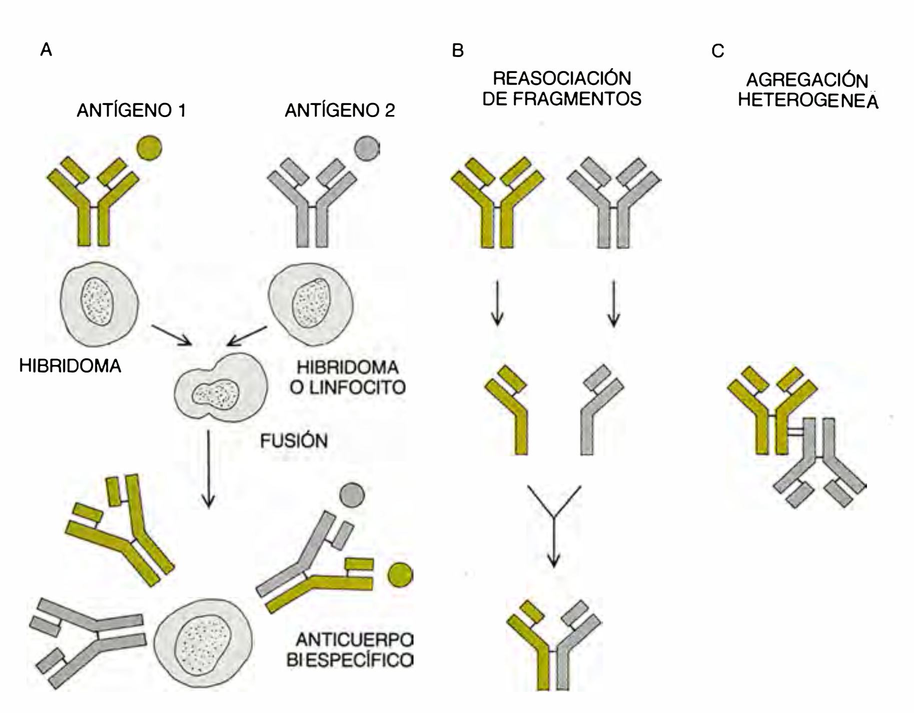
Siendo la hibridación de linfocitos *B* y mielomas el método por excelencia para la producción de AMM, se entiende que se haya extendido a la fabricación de células secretoras de AMH. Pero los mielomas, linfomas y líneas linfoblastoides *B* humanos ensayados en las fusiones son inferiores a los mielomas murinos, en lo con-

cerniente al rendimiento en la generación de hibridomas y a los niveles de secreción de inmunoglobulinas. Por otro lado, la mayoría de estas líneas humanas sintetizan o secretan constitutivamente fragmentos de inmunoglobulinas, lo que redunda en una menor proporción de anticuerpos específicos después de la fusión.

Para resolver las dificultades mencionadas se han desarrollado varias estrategias. Una de ellas es la fusión de los linfocitos *B* humanos y mielomas de ratón o de rata. Mejora así la frecuencia de formación de híbridos, pero tales heterohibridomas (hibridomas formados de dos especies diferentes) pierden eventualmente su capacidad de secretar inmunoglobulinas. Entre otras cosas, este efecto se debe a que el contenido genético de los híbridos entre células murinas y humanas es inestable, y con las generaciones en cultivo éstos pierden muy frecuentemente, y de manera selectiva, los cromosomas humanos. Para superar tal inestabilidad se han establecido líneas de heteromielomas, como parejas de fusión. Llámanse heteromielomas las células híbridas generadas a partir de la fusión de linfocitos humanos y mielomas de ratón o rata, constituidas en líneas estables luego del proceso de pérdida de algunos cromosomas humanos. Tras una nueva fusión con linfocitos humanos, el híbrido resultante manifestaría una mayor estabilidad debido, así se presume, a la presencia de ADN humano.

Hemos de considerar todavía un elemento de no menor interés: el estado fisiológico e inmunológico de los linfocitos *B* humanos que se emplean en la técnica de fusión. La fuente más asequible de linfocitos humanos es la sangre periférica, pero en ésta las células *B* son una minoría y se encuentran mayormente en estado de reposo, lo que no favorece la hibridación. Por otro lado, existen obvias dificultades prácticas y éticas para realizar o controlar la inmunización en el humano, así como para el acceso a las fuentes idóneas de linfocitos inmunológicamente activos: bazo, ganglios linfáticos y amígdalas.

Una posible solución para estos problemas quizá se halle en el empleo de la inmunización *in vitro* de linfocitos humanos. A pesar de que esta técnica es mucho más compleja que la utilizada en el caso de linfocitos de ratón, algunos grupos han establecido ya procedimientos eficaces de inmunización primaria y secundaria de linfocitos humanos en cultivo. En colaboración con Carl A. Borrebaeck, de la Universidad de Lund, hemos obtenido hibridomas secretoras de AMH contra proteínas de membrana externa de *Neisseria meningitides*, mediante la inmunización de los linfocitos *in vitro*. Estos resultados, y los obtenidos por otros grupos, sugieren que la inmunización en cultivo puede ser un elemento esencial para mejorar las posibilidades de generación de anticuerpos monoclonales humanos.



3. ANTICUERPOS BIFUNCIONALES, capaces de interactuar simultáneamente con dos antígenos diferentes. Pueden producirse por fusión de dos hibridomas o un hibridoma y un linfocito inmune, por reasociación de fragmentos de anticuerpos diferentes y por agregación heterogénea de anticuerpos.

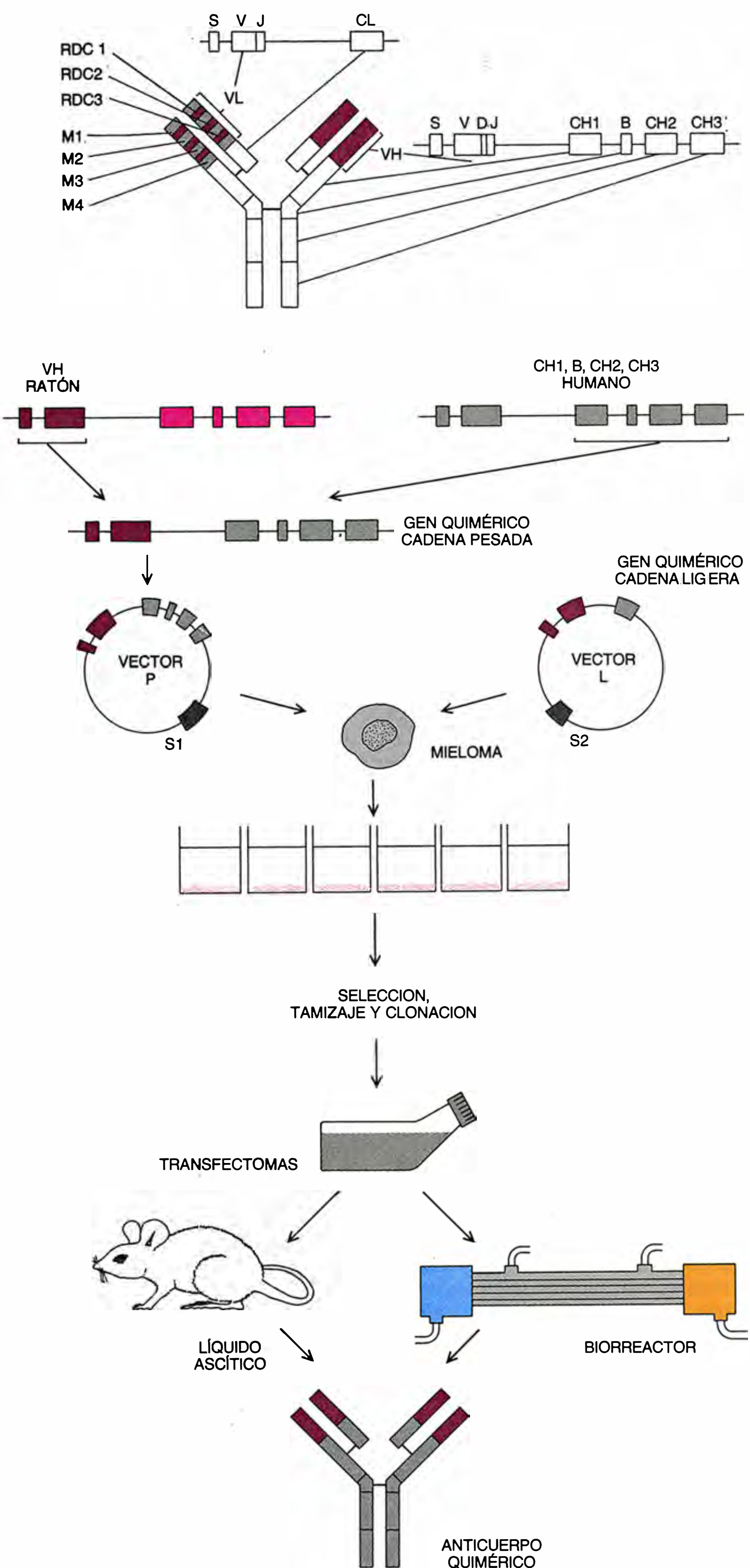
Otra forma alternativa de obtener células secretoras de AMH es a través de la transformación de los linfocitos *B* humanos con el virus de Epstein-Barr (VEB). La infección en cultivo de linfocitos *B* con VEB provoca una estimulación policlonal y, con el tiempo, la aparición de células capaces de replicarse en cultivo, secretando anticuerpos.

La transformación de linfocitos con el VEB es una técnica bastante sencilla. En ella se pueden emplear linfocitos de la sangre periférica, merced a las características de la interacción virus-célula. Pero no todas las células que incorporan el VEB se transforman; además, las células inmortalizadas tienen bajas capacidades de clonación y pobres niveles de secreción de inmunoglobulinas. Para evitar la eventual disminución y pérdida de esta producción luego de unos meses de crecimiento en cultivo, es ahora un procedimiento común que los clones de linfocitos transformados con el VEB se retrohibriden con mielomas o heteromielomas. Esta combinación parece también aumentar la secreción de AMH.

Todo ello nos indica que, en parte, el futuro de los AMH está en manos de los avances reales que se produzcan en los mencionados procedimientos para la obtención de líneas humanas estables y secretoras. Pero, ¿con qué nuevas posibilidades técnicas contamos para conjugar los éxitos conseguidos por los AMM y la urgente necesidad de anticuerpos para la seroterapia?

La tecnología convencional de producción de anticuerpos monoclonales, basada en la fusión de los linfocitos provenientes de un animal, permite, al menos en teoría, rescatar los mejores anticuerpos generados por la inmunización. Pero estos métodos tienen una fuerte componente de azar y no siempre se logran los hibridomas que secretan anticuerpos con la afinidad deseada, especificidades muy raras, funciones efectoras específicas, o con combinaciones particulares de especificidad, afinidad y función.

Como vimos ya en el caso del hombre, tampoco es posible generar anticuerpos monoclonales con igual facilidad para todas las especies. Por otro lado, la tecnología convencional no permite obtener anticuerpos con más de una especificidad o con funciones distintas de las fundadas en los mecanismos inmunes. Existen ya, sin embargo, varios procedimientos que dan origen a nuevos tipos de AM, de segunda generación, en cuyo desarrollo se confía para solucionar los problemas antes planteados.



Sabido es que la molécula de inmunoglobulina reconoce dos determinantes antigénicos iguales, gracias a la existencia de dos puntos de combinación idénticos. No obstante, sería muy útil, para muchas aplicaciones potenciales, contar con inmunoglobulinas en las cuales cada sitio de unión (o punto de combinación) reaccione con un determinante antigénico diferente, y les permita interactuar simultáneamente con antígenos distintos: hablamos, pues, de anticuerpos bifuncionales o biespecíficos.

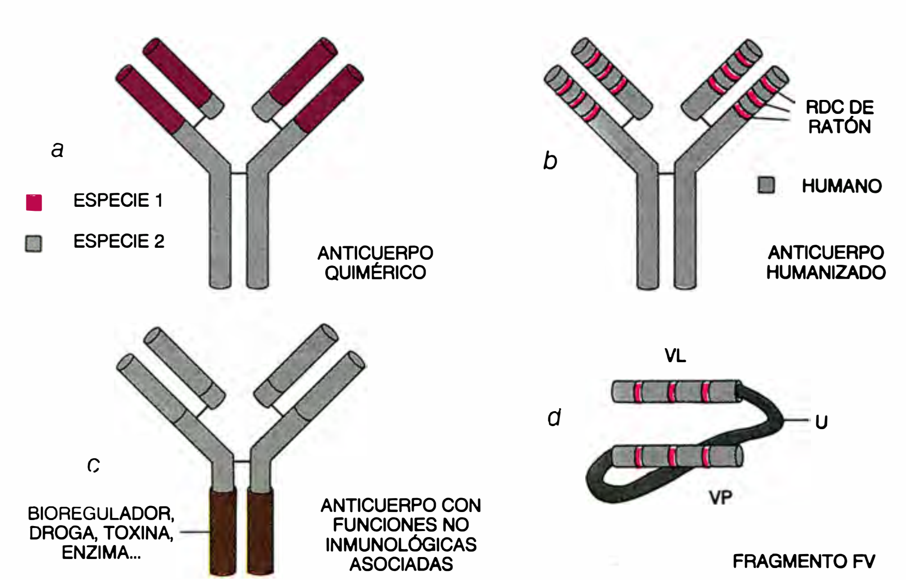
Empleando procedimientos químicos se han obtenido agregados heterogéneos de inmunoglobulinas diferentes, así como la unión de fragmentos de éstas. En el primer caso, las moléculas completas de dos anticuerpos diferentes se unen, en enlace covalente, empleando reactivos bifuncionales de diverso origen; para la reasociación química se precisa, por contra, la obtención de fragmentos monovalentes de anticuerpos distintos, que se reconstituyen en una sola proteína. Uno y otro método presentan serias limitaciones en lo relativo a la recuperación final y deficiencias por las alteraciones producidas en las propiedades de las moléculas (incluida su afinidad). A ello se suma, en el caso de los agregados, su funcionamiento inadecuado *in vivo*, debido al gran peso molecular y la presencia de

4. ESTRUCTURA BASICA de una molécula "tipo" de inmunoglobulina G y genes que la codifican (*arriba*). *S* representa el gen para el péptido señal; *VL* y *VH* son las regiones variables de la cadena ligera y pesada, determinadas por genes compuestos por la unión recombinativa de secuencias *V* y *J* (cadena ligera) o *V*, *D* y *J* (cadena pesada). En las regiones variables de cada cadena del anticuerpo se pueden detectar tres segmentos hipervariables que contienen los residuos que hacen contacto con los determinantes antigénicos; se denominan regiones determinantes de la complementariedad o RDC. El resto de la región variable se denomina "marco" (M), con los cuatro segmentos que acotan las tres RDC. Para las regiones constantes se observan los genes *CL* (cadena ligera) y *CH*1, *B* (por región "bisagra"), *CH*2 y *CH*3 (todos cadena pesada), que intervienen en las funciones efectoras de la molécula. Abajo se ejemplifica el proceso de producción de un anticuerpo "quimérico" ratón/humano. Los genes para el péptido señal (*S*) y la región variable (*VP*) de la cadena pesada de un anticuerpo específico de ratón se clonan a partir de ADN del hibridoma y se ensamblan con los cuatro dominios génicos de la región constante de una inmunoglobulina humana inespecífica de tipo IgG1. Estas construcciones se clonan en diferentes vectores de expresión (P y L) y se transfieren a mielomas de ratón. Los vectores contienen genes adicionales (S1 y S2) que confieren a las células transferidas la capacidad de crecer en medios de cultivo especiales; en las placas sólo se propagan los "transfectomas".

dos sitios de unión, que favorecen la modulación antigénica. Se llama modulación antigénica a la internalización de agregados de algunas proteínas de la membrana celular, o su expulsión al medio extracelular, mecanismo fisiológico éste en el cual se basan algunas funciones importantes en varios tipos celulares. Pero la agregación artificial de proteínas de la membrana, provocada por su unión a los sitios de combinación de un anticuerpo, puede llevar a una modulación inesperada que afecte la función de células normales, o a la pérdida momentánea del antígeno que deseamos como diana para un efecto antitumoral, en células cancerosas.

Varios investigadores han demostrado recientemente que la fusión de un hibridoma y linfocitos de animales inmunizados (triomas), o la de dos hibridomas (cuadromas), puede constituir una opción biológica alternativa para la producción de anticuerpos bifuncionales. En cualquiera de estos dos casos, las regiones variables y constantes de las cadenas de inmunoglobulinas de las células parentales permanecen en unidades transcripcionales independientes y los "hibridomas-híbridos" producen varias especies moleculares, de las cuales será anticuerpo bifuncional aquella que proceda de la asociación aleatoria de las cadenas pesadas y totalmente restringida de cadenas ligeras.

Las combinaciones de especificidad convierten a los anticuerpos bifuncionales en moléculas de particular atractivo en la terapia y el diagnóstico *in vivo*; así, para la destrucción de células tumorales o microorganismos, al ser reconocidos por un anticuerpo que reacciona también con células efectoras de la respuesta inmune; o para la acumulación de drogas citostáticas, toxinas o radioisótopos en un tumor, mediante un anticuerpo que reconoce los antígenos de estas células y las moléculas mencionadas; o, por último, para la facilitación de la trombolisis por anticuerpos monoclonales bifuncionales que identifiquen fibrina y fibrinolíticos. Los anticuerpos monoclonales bifuncionales se perfilan también como de mucha importancia para el desarrollo de sistemas inmunoenzimáticos homogéneos y acoplamientos funcionales de anticuerpos con otras moléculas.



5. ALGUNOS EJEMPLOS DE ANTICUERPOS y sus fragmentos: anticuerpo "quimérico" con regiones variables de una especie y constantes de otra (*a*); anticuerpo "humanizado", construido mediante la sustitución de las secuencias génicas que codifican para las regiones RDC de un anticuerpo humano, por las RDC de un anticuerpo de ratón (*color azul*), específico para el antígeno de interés (*b*); anticuerpo con funciones adicionales no inmunes, en el que los dominios *CH*2 y *CH*3 de la región constante se han sustituido por un gen no inmunoglobulínico, originándose una proteína fusionada (*c*); y fragmento Fv producido por la transformación de bacterias por un plásmido que contiene los genes de las regiones variables de la cadena ligera y pesada (*VL* y *VP*) en tándem, separadas por una secuencia que codifica para un "ligador" flexible (*U*), que permite la formación adecuada del sitio de combinación y confiere de esa manera una mayor estabilidad al fragmento (*d*).

Creíase, hasta hace poco, que la producción de anticuerpos por tecnología de ADN recombinante no era viable, debido a la imposibilidad de realizar en bacterias, o reproducir totalmente en levaduras, el procesamiento postranscripcional que experimentan las inmunoglobulinas. El trabajo de clonaje de los genes involucrados en la síntesis de las diferentes cadenas de un anticuerpo es también, en principio, muy complicado, al estar aquéllos distribuidos discretamente (varios exones separados por intrones reguladores) y ubicados en cromosomas diferentes.

Tomando como referencia la inmunoglobulina G, los anticuerpos poseen cuatro cadenas polipeptídicas, idénticas dos a dos, y con diferente peso molecular (pesadas y ligeras), ensambladas entre sí mediante puentes disulfuro. Cada una de estas cadenas posee regiones con un alto grado de conservación en su secuencia aminoacídica de anticuerpo a anticuerpo (regiones constantes), a las cuales se asocian la mayoría de las funciones efectoras de la molécula, y otras regiones de secuencia menos conservada (regiones variables), por donde se produce la interacción entre el anticuerpo y el antígeno. Los estudios de secuencia de proteínas y bases y de cristalografía de rayos X demuestran que las regiones variables de sus cadenas ligeras y pesadas poseen hacia el extremo amino-terminal tres segmentos hipervariables (regiones determinantes de la complementariedad, RDC) que contienen los residuos que establecen contacto con los determinantes antigénicos. El resto de la región variable se denomina marco (M), con cuatro segmentos (M1, M2, M3, M4), que acotan las tres RDC. La estructura constituida por la proyección tridimensional de las RDC de ambas cadenas forma el sitio activo que interactúa con el antígeno.

No obstante esta complejidad, la acumulación progresiva de conocimientos sobre las secuencias de estos genes, los avances en los procedimientos de clonación génica y en la construcción de vectores de expresión para eucariotas y procariotas, así como el refinamiento de los métodos de transferencia de ADN a células de mamíferos, han permitido obtener la clonación molecular de estos segmentos específicos del ADN y su expresión recombinante.

La producción de un anticuerpo por ingeniería genética conlleva, en general, tres pasos principales: la clonación y secuenciación de las regiones variables (específicas) del anticuerpo, a partir del ADN genómico o ADN complementario (ADNc) de linfocitos o hibridomas; el ensamblaje de regiones variables o sus segmentos RDC, junto a regiones constantes, en vectores de expresión para eucariotas o procariotas, según el tipo de molécula que se desee producir, y, en tercer lugar, la transferencia (también llamada transfección) del vector a células receptoras y selección de los "transformantes" o "transfectomas" (según se trate de bacterias o leva-

duras, o de células de mamíferos, respectivamente).

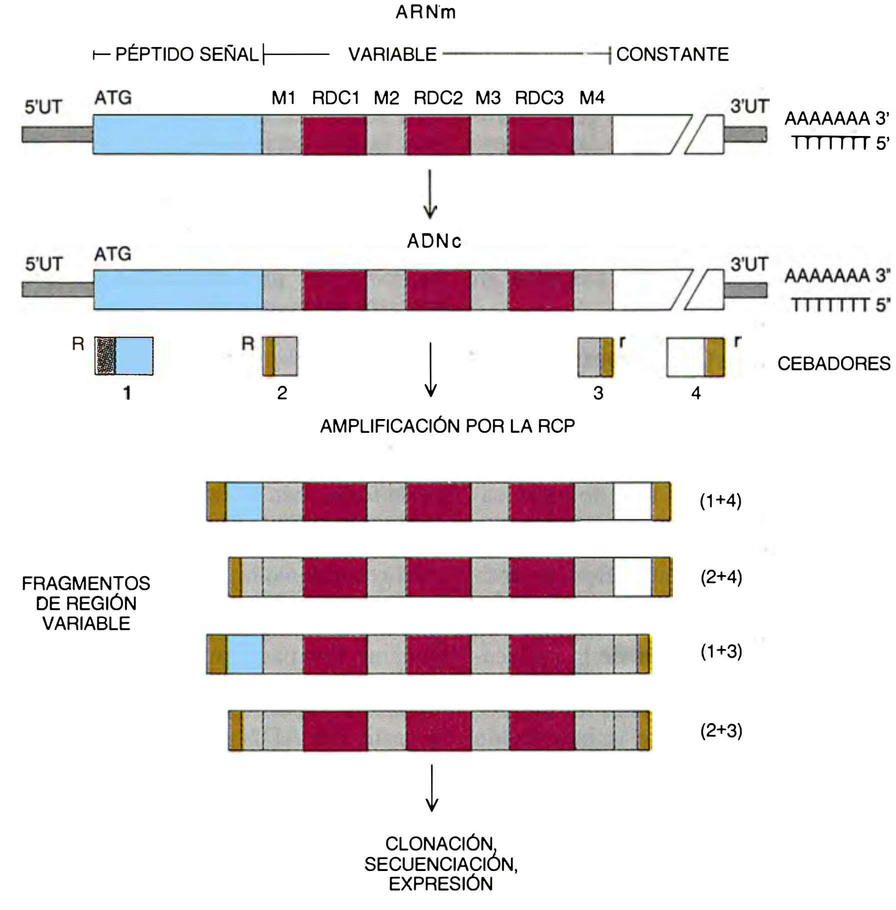
Mediante procedimientos como los mencionados se ha logrado ensamblar segmentos génicos que determinan regiones variables de anticuerpos de ratón, en conjunción con regiones constantes de anticuerpos humanos. La expresión de estos genes quiméricos murino-humanos en células de mieloma lleva a la producción de anticuerpos que retienen la especificidad de unión y la afinidad de los AMM originales, pero manifiestan a la vez una mayor vida media biológica *in vivo*, funciones efectoras más eficientes y mejor tolerancia al ser administrados al ser humano, debido a los dominios constantes de esta especie. En el camino hacia la "humanización" de anticuerpos murinos por ingeniería genética se ha llegado, por ejemplo, a la construcción de anticuerpos donde aparecen sólo las regiones RDC del AMM. De ese modo, el anticuerpo conserva la especificidad original del anticuerpo monoclonal de ratón o rata, pero el resto de su estructura corresponde a una inmunoglobulina humana. Los anticuerpos así humanizados se han empleado ya en ensayos clínicos controlados, donde han resultado tan activos *in vivo* como los propios anticuerpos monoclonales originales, sin las usuales respuestas de anticuerpos murinos en los pacientes.

Otra línea de trabajo en la modificación de anticuerpos por ingeniería genética se ha centrado en la combinación de regiones variables específicas y secuencias no inmunoglobulínicas, para crear proteínas fusionadas que expresen el reconocimiento del anticuerpo y, además, posean actividades enzimáticas, tóxicas, biorreguladoras o sirvan para la purificación de antígenos. En ese orden, se ha logrado, por ejemplo, combinar el gen para la región variable (cadena pesada) de un AMM anti-fibrina con el segmento génico que determina la cadena beta del activador tisular del plasminógeno. Luego de transferir la construcción a hibridomas anti-fibrina deficientes para la cadena pesada, las células producen un anticuerpo capaz de reconocer el trombo y participar en su destrucción.

Los trabajos no sólo han avanzado utilizando la expresión de células de mamíferos. Aunque las bacterias no pueden ensamblar correctamente la compleja estructura de un anticuerpo, sí pueden producir sus fragmentos. Varios grupos acaban de resolver los problemas relacionados con la obtención de la proteína en forma soluble y activa, evitando de ese modo las complicaciones que conlleva su renaturalización. Los fragmentos de anticuerpos —tipos Fv y Fab—, producidos en bacterias, ofrecen gran atractivo en el campo del diagnóstico y de la terapéutica *in vivo* merced a su pequeño tamaño. Los fragmentos Fv están constituidos exclusivamente por las regiones variables de las cadenas pesada y ligera, formando el sitio activo específico del anticuerpo sin mediar puentes de azufre para su conformación. Los Fv, de pequeño tamaño, parecen ideales para su empleo en la detoxificación, el transporte dirigido y la catálisis, si bien las interacciones débiles que unen las regiones variables los hacen muy inestables a temperaturas fisiológicas. Para resolver este problema, algunos grupos han situado un ligador sintético flexible, que une directamente los genes para las regiones variables de las dos cadenas y que, al ser traducido en proteína, no obstruye la formación del sitio activo de la molécula; confiere, por contra, una mayor estabilidad a estos fragmentos.

Otros nuevos avances comienzan a dejar sentir su influencia en la difusión de la producción de anticuerpos recombinantes. Así, uno de los pasos limitantes para la rápida construcción de estos anticuerpos ha sido el trabajo de clonación de las regiones variables a partir del ADN genómico de hibridomas y linfocitos, que por los métodos tradicionales implica la fabricación de una librería y un arduo trabajo de tamizaje con sondas. Nuestro grupo, en estrecha colaboración con James W. Larrick y otros colegas de Genelabs Inc., ha empleado con éxito la reacción en cadena de la polimerasa (RCP) para la clonación rápida de las regiones variables de inmunoglobulinas humanas y de ratón.

La RCP permite la multiplicación (amplificación) de secuencias génicas desconocidas a partir de la extensión enzimática de cebadores sintéticos que hibridan con secuencias conocidas presentes en los extremos de los genes. La síntesis mediada por la en-

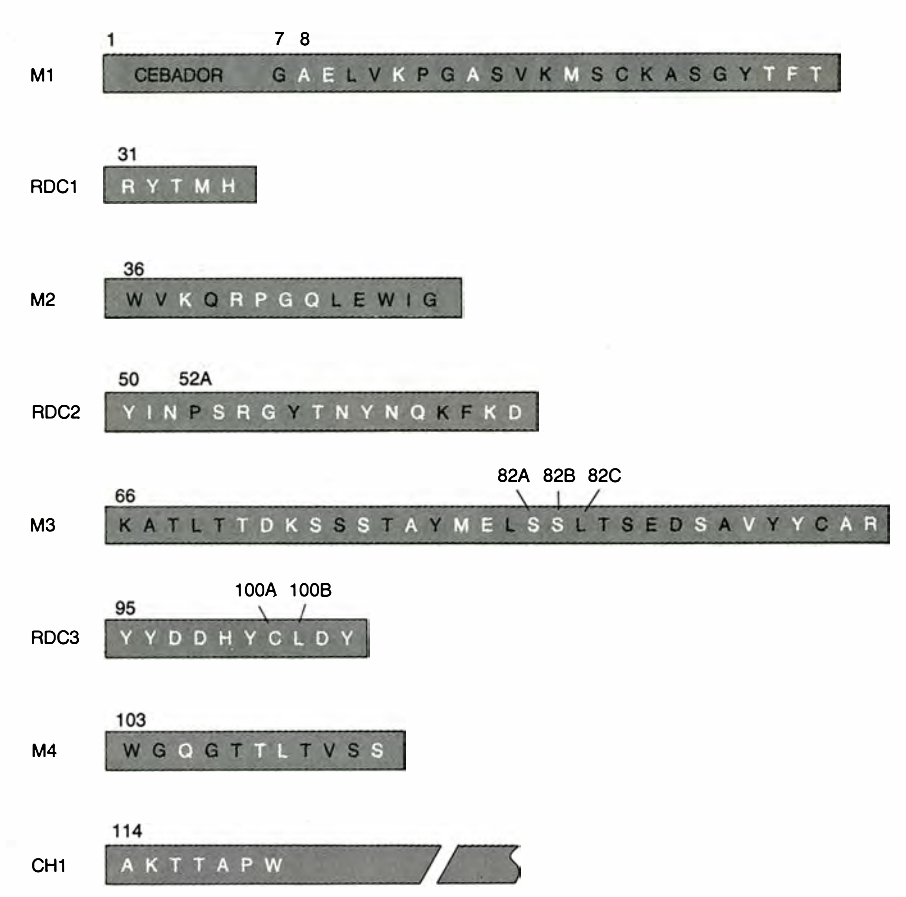


6. ESTRATEGIA GENERAL PARA LA CLONACION de fragmentos de la región variable de inmunoglobulinas, a partir de células secretoras. A la obtención de ARN a partir de hibridomas o linfocitos transformados le sucede la separación de ADN complementario de simple cadena, con oligo-dT como cebador. La multiplicación por la RCP emplea cebadores que se hibridan con las regiones que determinan el péptido señal o M1 (extremo 5′ del gen), y M4 o *CH1* (extremo 3′). A tenor de la pareja de cebadores empleados, la región multiplicada puede incluir el péptido señal y parte del primer dominio de la región constante. Los cebadores se diseñan con sitios de restricción (*R* y *r*) en sus extremos 5′, por lo que, luego de la amplificación de la secuencia acotada, ésta es susceptible de clonación en vectores de secuenciación o de expresión. *UT* indica regiones sin traducir.

zima ADN polimerasa, en las hebras opuestas del ADN desnaturalizado, procede a través de la región acotada por los cebadores, lo que produce la multiplicación selectiva del gen de interés, luego de varios ciclos consecutivos de desnaturalización, hibridación y extensión enzimática. Debido a que los oligonucleótidos sintéticos empleados se pueden diseñar con sitios de restricción, el ADN empleado es susceptible de clonación inmediata.

En la aplicación de la RCP para la clonación de las regiones variables de las inmunoglobulinas hemos empleado ADN complementario que fabricábamos a partir de ARN extraído de linfocitos o hibridomas. Gracias al alto grado de conservación existente en las secuencias de los extremos de los genes maduros que determinan los anticuerpos de una misma especie, se diseñaron cebadores que acotan la región variable por las secuencias conservadas del péptido señal, o del "marco 1" (M1), para el extremo 5′, y por las secuencias del M4 o de los primeros dominios constantes (C kappa o lambda y CH1), para el extremo 3′. Luego de multiplicado el segmento en cuestión, y aprovechando los sitios de restricción con que se construyeron los cebadores, se clonaron las regiones variables en vectores para secuenciación y se verificó su estructura en función de los bancos de datos existentes. Además del ahorro extraordinario en tiempo y esfuerzo para la clonación, hemos demostrado que la RCP puede iniciarse a partir del ARN extraído de una sola célula, lo que puede tener una gran importancia práctica en las posibilidades del "rescate" temprano de regiones variables a partir de linfocitos humanos recién transformados.

La clonación por RCP se aplica ya para fabricar bibliotecas del repertorio de regiones variables de una especie. Para ello, el ARN se extrae del bazo de animales sin inmunizar, se amplifican selectivamente por RCP las regiones variables de cadenas ligeras y pesadas (incluyendo en cada caso parte de las regiones constantes correspondientes) y se clonan en bacteria o en fago. La combinación azarosa de estos clones da lugar a un amplio repertorio de especificidades (en forma de fragmentos de anticuerpos), del que se seleccionaría aquella que reconoce el antígeno de interés. Aunque es obvia la atracción que presentan las bibliotecas de amplios repertorios de regiones variables, existe una seria dificultad: sin la inmunización previa del animal, las regiones variables expresadas por los linfocitos *B* no maduran su afinidad resultante



7. SECUENCIA DE AMINOACIDOS para la región variable de la cadena pesada del anticuerpo monoclonal de ratón IOR-T3 (anti CD3), según las diferentes regiones "marco" (M) y determinantes de la complementaridad (RDC). Los números indican el orden de los aminoácidos en la proteína; las letras en negrita señalan los aminoácidos conservados en la familia II*B* de las regiones variables de cadenas pesadas de ratón (según Kabat). Para obtener la secuencia de bases que dio origen a esta estructura de aminoácidos, se extrajo el ARN del hibridoma, se fabricó ADN complementario y se multiplicó selectivamente la región variable de la cadena pesada empleando la RCP y oligonucleótidos sintéticos especialmente diseñados para la hibridación con las bases que codifican para los aminoácidos 1 al 7 de la región *M*1 (5′ del gen) y 120 al 131 del dominio *CH*1 (3′ del gen). Los cebadores sintéticos tenían sitios de restricción *Eco*RI y *Hind*III, respectivamente, lo que permitió la subclonación de los fragmentos amplificados en M13*mp*18 y *mp*19, y su secuenciación posterior.

de la mutación somática que se ha producido durante la estimulación *in vivo* con un antígeno particular.

Siguiendo esos mismos métodos, a partir de ahora de linfocitos de animales inmunizados, se investiga la producción de fragmentos que contienen sólo la región variable de la cadena pesada. Greg Winter y su grupo, de Cambridge, y Richard Lerner y colaboradores, del Instituto Scripps, han aportado pruebas que abonan la importancia de esa región variable en la determinación de la especificidad final de todo el sitio activo. Los anticuerpos de dominio simple, con igual especificidad y afinidad semejante a las del anticuerpo original, tendrían una aplicación potencial en la catálisis y en la detoxificación y transporte de drogas, toxinas y radioisótopos *in vivo*.

En los apenas 15 años que nos separan del descubrimiento de la tecnología de los anticuerpos monoclonales, estos biorreactivos se han convertido en la principal aplicación de la biotecnología actual, amén de constituirse en la solución de futuro de los problemas que plantea el diagnóstico y la terapia de los tumores malignos. La propia amplitud del repertorio natural de especificidades de los anticuerpos y las nuevas posibilidades que se suman gracias a la manipulación de éstos auguran la continuidad de su desarrollo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GENETICALLY ENGINEERED ANTIBODY MOLECULES. S. L. Morrison y V. T. Oi. en *Advances in Immunology*, vol. 44; págs. 65-92; 1989.

CONSTRUCTION OF RECOMBINANT THERAPEUTIC MONOCLONAL ANTIBODIES. J. W. Larrick, J. V. Gavilondo, M. J. Coloma y K. E. Fry en *Therapeutic Monoclonal Antibodies*, capítulo 2; págs. 17-34. Stockton Press, Nueva York, 1990.

El arte maya a registro

La aceleración del desarrollo económico está echando a perder los murales mayas, por lo que sus réplicas pintadas a mano vienen a ser fuentes imprescindibles para la arqueología

June Kinoshita

Fue en 1900 cuando Adela Catherine Breton entró por primera vez en el campo arqueológico de la ciudad ritual maya de Chichén Itzá. Ataviada con victoriano atuendo de amazona, protegiendo su aniñado rostro del terrible sol del Yucatán con un sombrero de ala ancha, la Breton ofrecería, a sus 50 años, un aspecto bien curioso. Durante los ocho años siguientes, aquella brava inglesa desafió al calor, a las garrapatas y a los pesadísimos burócratas para volver una y otra vez a Chichén Itzá con el único propósito de reproducir, en dibujos y pinturas, los pétreos relieves y los polícromos murales que animaban las ruinosas paredes de piedra calcárea.

Los estudiosos de la cultura maya han de estarle hoy agradecidos a esa mujer. En los 80 años y pico transcurridos desde sus visitas, muchos de los murales con tanto trabajo copia-



dos por ella en Chichén Itzá y en otros asentamientos mayas han desaparecido del todo. La humedad y el ardiente sol del clima centroamericano se han venido cobrando un pesado tributo sobre los colores, particularmente sobre el "azul maya", un celeste intenso basado en índigo. El vandalismo y los turistas han hecho desaparecer numerosos fragmentos, y las pinturas que quedan están expuestas al incesante ataque de algas y vegetación. En muchos casos, las acuarelas de la Breton son ya los únicos documentos fehacientes de aquellos restos mayas. Su obra fue donada al Museo Peabody de la Universidad de Harvard y, en Inglaterra, al Museo Municipal de Bristol y a la Art Gallery, instituciones que conmemoraron las recreaciones de la artista con una exposición especial celebrada el invierno del año pasado.

No fue la Breton el único excéntrico victoriano que se dedicase a explorar el mundo y a registrar sus impresiones en un cuaderno de apuntes, pero ella destacó por la rigurosa atención que prestó al colorido. "Los murales están cargados de informes transmitidos mediante el color", dice Arthur G. Miller, profesor de historia del arte en la Universidad de Maryland en College Park.

Brillante colorido

Miremos hoy la deterioradísima escena de batalla pintada sobre el muro meridional del Templo Superior de los Jaguares en Chichén Itzá (900-1100 d.J.C.). En la acuarela de la Breton los escudos circulares de los combatientes tienen los bordes pintados de rojo o de azul, como distintivos de los dos ejércitos contrarios. "El color forma parte de la visión del cosmos de los antiguos mesoamericanos", afirma George E. Stuart, de la National Geographic Society.

Por ejemplo, los puntos cardinales están representados cada uno por un color: el este, por el rojo; el oeste, por el negro; el norte, por el blanco; el sur, por el amarillo; y el centro, por un azul verdoso. "El color de las vestes de las deidades" –sigue explicando Stuart– "indica a qué asociaciones tienden." "Para los humanos, el color puede significar rango o procedencia. Las formas de los objetos pueden ser similares: sin color resulta difícil decir si algo es jade o maíz." Miller hace notar que "la mayor parte de lo esculpido estuvo también pintado, mientras que hoy sólo vemos desnuda piedra caliza. Las pinturas murales nos dan alguna idea del aspecto que debieron de tener los relieves policromados".

No sólo las pinturas y las esculturas, sino también las ciudades enteras ostentaron un "brillante colorido", apostilla Merle Greene Robertson, directora del Instituto de Investiga-



1. GUERREROS vistosamente engalanados rinden homenaje a un individuo enmascarado al que rodea con sus anillos un dios ofidio emplumado, en un relieve pétreo del Templo Inferior de los Jaguares de Chichén Itzá (izquierda). *Adela Breton registró la pigmentación coloreando a la acuarela una fotografía en blanco y negro. En Chichén Itzá, Mrs. Breton pintó también a la acuarela réplicas de las escenas de batalla que ornaban las paredes interiores del Templo Superior de los Jaguares* (derecha). *Aquí se muestra un detalle de la pared del sur. Los murales están ya casi borrados del todo, como lo patentiza una fotografía tomada en 1984* (encima de estas líneas).

ción del Arte Precolombino en San Francisco. Y debe de saber lo que dice, pues en 1973 emprendió una minuciosa inspección del color en Palenque. Esta ciudad del período clásico, situada en medio de exuberante vegetación selvática y en las faldas de una serie de colinas que se elevan al norte del estado de Chiapas, llegó a su máximo esplendor durante el reinado de Pacal el Grande (615-683 d.J.C.). Es famosa por sus delicados relieves coloreados al estuco y por sus numerosas inscripciones jeroglíficas.

Utilizando un libro de gamas de color corriente, Robertson, a la que sus colegas mayanistas describen cariñosamente como "la típica ancianita con zapatillas deportivas", se dedicó a documentar los restos de las pinturas que adornaron otrora edificios y bajorrelieves. Según Robertson, los muros estuvieron antaño pintados interior y exteriormente de rojo vivo. La piel de los humanos se representaba en rojo, la de los dioses en azul.

Cuando Robertson empezó a realizar su proyecto, la mayoría de las superficies pintadas estaban aún limpias, recuerda. Pero a comienzos de la década de los ochenta se encontraban ya recubiertas de una "negra costra", que se forma al reaccionar la piedra calcárea con la humedad ácida. Las microscópicas incrustaciones oscurecían lo poco que quedaba del color. Ella atribuye la negra escoriación a la lluvia ácida que cae por influjo de los pozos de petróleo explotados al descubierto y las humaredas de las industrias que hay a lo largo de la costa del Golfo, en las cercanas ciudades de Coatzacoalcos y Carmen, a 125 kilómetros al norte de Palenque.

Robertson hizo sonar la alarma contra la lluvia ácida el año pasado, en un estudio para la National Geographic Society. Informaba allí de que, en el famoso Templo de las Inscripciones de Palenque, la costra negra era "tan espesa que, al mirarlas [las inscripciones], parecía que se estuviese viendo un bloque compacto de escultura negra". Seymour Z. Lewin, químico de la Universidad de Nueva York, que ha examinado los efectos de la intemperie sobre las pátinas en diversos yacimientos arqueológicos mayas, está de acuerdo en que "hay pruebas del típico deterioro que produce la lluvia ácida"; pero añade que "la pintura es más perjudicada por los microorganismos y por la lixiviación de la sal" que por la lluvia ácida.

Estaba Robertson a punto de concluir su inspección de Palenque cuando, en 1982, ocurió el desastre: El Chichón, volcán que llevaba 600 años dormido, entró de repente en erupción, lanzando una densa nube de cenizas y gotas de ácido sulfúrico. La erupción arrojó centenares de toneladas de ceniza abrasiva sobre Palenque, dejándola como si hubiese sido azotada por un espantoso vendaval. Mary E. Miller, especialista en maya de la Universidad de Yale (sin relación ninguna con Arthur Miller), señala: "Cuando llegaron las lluvias se llevaron la negruzca capa, pero arrancaron también con ella la pintura". A las seis semanas de la erupción "parecía que hubiesen fregado todo el lugar con lejía y estropajo".

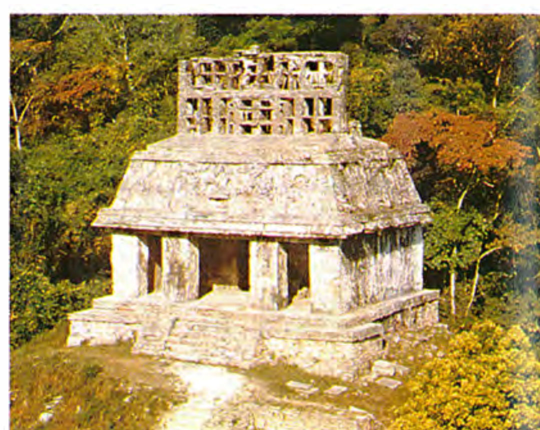
Por suerte, las documentaciones realizadas para entonces por Robertson eran lo bastante completas como para permitirle reconstruir el aspecto original de los edificios de Palenque en una serie de vívidas pinturas. "Pienso que las reconstrucciones de Robertson son muy buenas", afirma Mary Miller. "Los colores parecen sólidos, lisos y brillantísimos... y así es como fueron."

Tan urgente como la de devolver a





2. TEMPLO DEL SOL, en Palenque. Fue coloreado con hematites (óxido de hierro) y adornado con frisos polícromos, según puede verse en esta reconstrucción de Merle Greene Robertson (izquierda). *Hoy día, este templo del siglo* VII *se destaca crudamente blanco sobre el trasfondo de la pluviselva* (abajo). *En la foto de arriba, la mano de Robertson sostiene una muestra de color junto a los restos de pigmento que quedan sobre la mejilla de la Señora Zac Kuk, reina que fue de Palenque.*



las ruinas su perdido cromatismo es la tarea de ir registrando debidamente los murales que aún sobreviven. Ni siquiera las más célebres de las pinturas mayas –los murales de Bonampak– se han registrado y documentado todavía como es debido. Este remoto yacimiento tardoclásico, escondido en el rincón sudeste del estado de Chiapas, fue expuesto por primera vez a la atención del resto del mundo por el explorador inglés Giles G. Healey, quien fue conducido allá en 1946 por unos campesinos locales.

Destrucción involuntaria

Datables hacia el 800 d.J.C., los murales de Bonampak adornan el interior de tres cámaras pétreas. Sus imágenes, realistas y de brillantes colores, representan una batalla, sus sangrientas consecuencias y la celebración de la victoria. Por la época en que se descubrió Bonampak, era opinión establecida que los mayas clásicos fueron una raza pacífica y que no escribió historia. Bonampak dio al traste con tal opinión y reveló lo que en realidad fueron los mayas: un pueblo belicoso que registró su pasado y su presente en jeroglíficos. "Bonampak supuso un momento decisivo para los estudios de la cultura maya", anota Mary Miller.

Debido a su importancia, la precaria condición de los murales alarma a muchos estudiosos. "El lugar estuvo oculto entre la espesa pluviselva tropical y se mantuvo semienterrado y a oscuras durante 1000 años", explica Mary Miller. "Lo primero que hicieron nada más encontrar los murales fue talar los árboles y cubrir el yacimiento con una techumbre de láminas de zinc. Por lo que aumentó allí mucho el calor durante el día, en contraste con el frío de la noche." En la década de los sesenta, los conservadores inyectaron silicona en los muros, lo cual puso tersas las pinturas "como le habría sucedido al cutis de una mujer", observa la misma especialista. "Pero luego la silicona se fue derritiendo y los murales terminaron peor que estaban." Los conservadores destruyeron también, sin querer, varias partes del mural cuando cementaron sus grandes grietas.

Hace pocos años se limpiaron los murales. Sobre la superficie pintada se había ido endureciendo una capa lechosa de carbonato de calcio; al quitarla, aparecieron las escenas subyacentes en toda su gloriosa plenitud. Lo que resulta irónico es que tal limpieza pudo acelerar su destrucción. "Pues la causa de que sobrevivieran es, ante todo, que estuvieron resguardadas por la capa de carbonato



3. ASI ESTABAN LOS MURALES DE BONAMPAK antes de su reciente limpieza (arriba). *Habían sido oscurecidos por una blanca costra de carbonato cálcico, que aparecía también sobre el techo, y sólo se los pudo ver mejor humedeciendo la costra con agua o con queroseno. En la hilera superior hay unos nobles que llevan capas blancas. Bajo ellos, unos músicos baten tambores y agitan sonajas celebrando la victoria en el combate. Una vívida réplica* (abajo) *pintada por Felipe Dávalos para el Museo de Historia Natural de Gainsville reconstruye exquisitos detalles de las vestimentas y jeroglíficos mayas.*





de calcio", dice Mary Miller. Ahora que las pinturas carecen de esa protección, se hallan expuestas a los cambios de temperatura, a la humedad y a los microorganismos. "Es peligroso –se teme ella– haberlas sacado a la luz sin procurarles una mejor protección." "Me preocupa su futuro."

Necesidad urgente

Hay, por tanto, urgente necesidad de llevar a cabo un registro moderno de los murales de Bonampak. Cierto que ya se han hecho algunos, entre ellos las fotografías realizadas en 1946 por Healey, otras de Hans Ritter y cuatro pinturas reconstructivas, una de las cuales trata de recuperar con espectacular detallismo la primera cámara. Fue pintada a mediados de la década de los setenta por Felipe Dávalos para el Museo de Historia Natural de Florida en Gainsville.

Pero, con todo y ser buenas algunas de estas reconstrucciones –particularmente las trabajadas por Dávalos–,

4. GUERRERO pintado de negro y adornado con magnífico plumaje de ave, que destaca en la pintura de un muro palacial de Cacaxtla (arriba). *Una tortuga exorna otra sección del muro* (abajo). *Se cree que estos murales fueron pintados por artesanos mayas contratados por los señores de este emplazamiento olmeca-xicalanca, 500 km al oeste del dominio maya.*



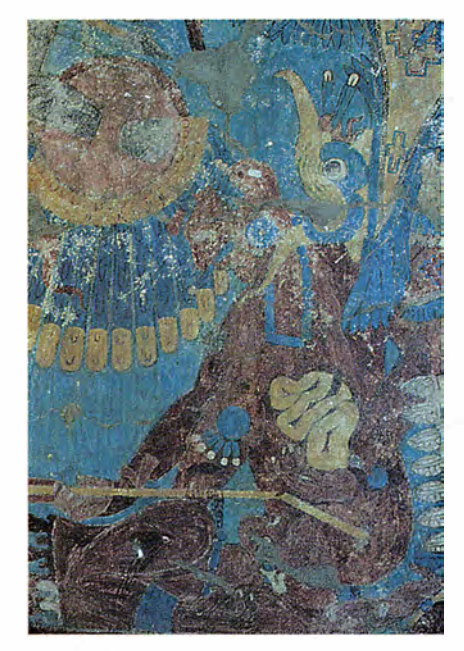
ninguna es completa, al decir de los expertos. Salvo en la reconstrucción de Dávalos, "los jeroglíficos parecen *spaghetti*", asegura Stuart. "Es difícil dibujar eso. A mí me llevó todo un año el aprender a dibujar según el estilo del arte maya." Breton le decía así en una carta a su colega Alfred M. Tozzer: "Para trazar las figuras [del arte maya] se requeriría no la habilidad artística moderna, sino la muy diferente capacidad de verlas como las veían los americanos antiguos".

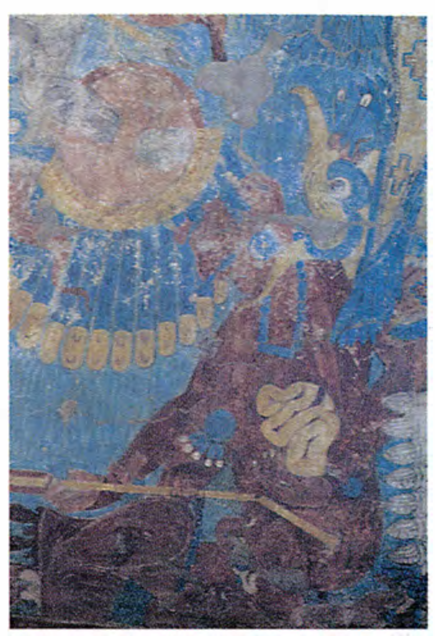
Según Stuart, "los murales de Bonampak nunca han sido adecuadamente fotografiados ni dibujados en su integridad". Esta situación puede que cambie pronto. Roberto García Moll, director del Instituto Nacional de Antropología e Historia de México, ha mostrado interés por tal proyecto. Mary Miller apoya este movimiento, afirmando que "el registro documental importa más que las restauraciones".

Cacaxtla

Por toda Centroamérica se siguen descubriendo nuevas pinturas murales. El año pasado unos arqueólogos mexicanos desenterraron una escalinata en Cacaxtla, ruinoso complejo palacial situado 100 kilómetros al este de la ciudad de México, y en los dos muros que flanquean los escalones descubrieron un par de impresionantes pinturas que, por la viveza de su colorido, parecían recién terminadas. Junto con otros dos murales, que fueron hallados a mediados de la década de los setenta en Cacaxtla, este nuevo descubrimiento convierte al grupo en uno de los principales de Centroamérica. Los murales fueron pintados entre los años 655 y 835 d.J.C. por los olmeca-xicalanca, pueblo originario probablemente de la costa del Golfo, según dice Ellen T. Baird, de la Universidad de Nebraska en Lincoln. "Trátase –en opinión de esta misma especialista– de una mezcla única del estilo maya con motivos centromexicanos."

El que los estilos se mezclaran parece que se debió, según el finado Donald Robertson, de la Universidad de Tulane, a que los señores de Cacaxtla contrataron a artistas mayas, los cuales pintaron en su estilo nativo pero introdujeron glifos propios del altiplano mexicano, conforme a los deseos de sus patronos. A Mary Miller le asombra la peculiar manera de ser representado el dios del maíz en los murales recién descubiertos: en las puntas de las cañas, entre las verdes hojas, asoman las doradas mazorcas con figura de rostros humanos.









5. *LOS COLORES empiezan a desvaírse en cuanto las pinturas son expuestas a la luz. Dos fotografías de una escena bélica de un mural de Cacaxtla, hecha una en 1978* (arriba, a la izquierda) *y la otra en 1989* (arriba, a la derecha), *ponen de manifiesto el deterioro del "azul maya" basado en índigo, mientras que el rojo de la hematites ha permanecido estable. En Tulum, porciones de un mural han sido borradas por los manoseos y ennegrecidas por la contaminación del aire, como lo evidencian dos fotografías, una de 1966* (abajo, a la izquierda) *y la otra de 1985* (abajo, a la derecha).

"Es ésta –dice– una iconografía para mentes muy infantiles."

El gobierno mexicano ha hecho construir sobre todo el yacimiento un amplio cobertizo. Pero los murales desenterrados a mediados de la década de los setenta se han descolorido ya bastante, se quejan los observadores. Por fortuna, han sido copiados por un equipo de técnicos mexicano. Las pinturas halladas últimamente en Cacaxtla fueron fotografiadas el invierno del año pasado bajo los auspicios de la National Geographic. Estos murales se encuentran en tan excelentes condiciones de conservación que sus registros fotográficos pueden ser adecuados, afirma Mary Miller. Los que conservan menos de sus valores prístinos tal vez requieran también la copia a mano. "Aunque a mucha gente les parezca anticuado tal

procedimiento, sin embargo el ojo puede ver cosas que la cámara no puede captar”, asegura ella.

Lo más importante es que se haga el registro y documentación de “lo que queda, antes de que se borre y desaparezca del todo”, reconoce Arthur Miller. Pero no hay muchas personas que estén dispuestas a dedicar el tiempo y el esfuerzo que esos registros requieren. El mismo advierte que su propio trabajo sobre los murales de Tulum, conjunto postclásico (siglos XV y XVI) colgado en los acantilados de la costa este del Yucatán, le llevó cuatro años enteros. “Se necesita absoluta dedicación, experiencia y penoso esfuerzo”, sostiene. “No tiene nada de romántico.”

Adela Breton habría estado de acuerdo. La labor de copiar las pinturas murales “cansa mucho la cabeza y los nervios, y también los ojos y la mano”, se quejaba ella a un conocido. Y puede que una de las razones de que los murales de Bonampak nunca hayan sido replicados por completo sea sencillamente que a los artistas copiadores se les agotan el ánimo y las energías. Los esfuerzos de Dávalos al tratar las estancias segunda y tercera distan mucho de ser comparables con su reconstrucción de la primera. Otra artista que se puso a hacer una réplica de Bonampak en la ciudad de México empezó por la tercera estancia, pero le flaquearon las fuerzas cuando pasó a las otras.

Las buenas réplicas son cada vez más importantes, porque muchos yacimientos arqueológicos mayas están muy expuestos a los estragos del desarrollo económico. En Tulum los muros se ennegrecen con el hollín de los tubos de escape de los autobuses turísticos. Los turistas, que traen las muy necesarias divisas extranjeras, hacen que aumente la humedad en el interior de las cámaras pétreas y exhalan esporas vegetales que pueden arraigar en los muros. Los pozos petrolíferos y las humaredas de la Pemex, la compañía petrolera nacional de México, puede que contribuyan a la lluvia ácida. “Hay una tensión entre la conservación y la economía”, observa Arthur Miller. La solución está –sugiere– en hacer réplicas e instalarlas en el lugar de los originales, que a su vez deberán reinstalarse en museos.

Aun con estas salvaguardas, es inevitable que se vayan degradando las obras de arte antiguas, en especial las pinturas. “El hallarlas y sacarlas a la luz quizá sea también exponerlas a la destrucción”, observa Stuart. “Por eso necesitamos recogerlas en registros que nos las conserven... para siempre.”

Taller y laboratorio

De qué modo observar la radiación ultravioleta procedente del Sol

Forrest M. Mims III

La mayor parte de la radiación ultravioleta que bombardea la Tierra, procedente del Sol, no llega a la superficie de nuestro planeta; se opone a ello un grueso manto de un gas tóxico, de color azul pálido: el ozono. De no ser por ese escudo químico, la incidencia de los rayos ultravioleta sería tan intensa que perecería la mayoría de los organismos. Puesto que la actividad humana y los sucesos naturales, las erupciones volcánicas entre otros, alteran la composición de la atmósfera, resultaría más que prudente vigilar la capa de ozono y la radiación ultravioleta para observar los posibles cambios.

Gracias a numerosas estaciones terrestres y varios satélites artificiales, los investigadores conocen bastante bien la densidad y distribución del ozono atmosférico. Carecen, sin embargo, de una red comparable que les permita observar la radiación ultravioleta que se infiltra por la capa de ozono. Aparte de los instrumentos que manejan la Institución Smithsoniana y algunas organizaciones más, la única red norteamericana de estaciones de detección ultravioleta no posee ni siquiera dos docenas de medidores Robertson-Berger.

Estos instrumentos están diseñados para detectar las longitudes de onda de la radiación ultravioleta capaces de producir eritemas, o enrojecimiento de la piel, y posibles quemaduras solares. Los eritemas no tardan en producirse en cuanto nos exponemos a una radiación ultravioleta de longitud de onda próxima a 300 nanómetros. Esta longitud de onda cae dentro del llamado espectro ultravioleta B, que abarca de 280 a 320 nanómetros.

Desde 1974 se ha venido registrando el flujo ultravioleta B medio con una red de ocho medidores Robertson-Berger. Entre 1974 y 1985, el flujo medio bajó del orden del 0,7 por ciento al año. Ahora bien, como el ozono estratosférico situado encima de la red disminuyó del orden del 0,3 por ciento anual entre 1978 y 1985, cabría haber esperado un alza en la radiación ultravioleta B.

Tal disminución del flujo ultravioleta B estaba posiblemente relacionada con la instalación en zonas urbanas de todos los medidores Robertson-Berger. Una investigación independiente había demostrado que los medidores situados en zonas rurales recibían del 5 al 7 por ciento más flujo ultravioleta B que los medidores urbanos. Otro estudio ha revelado que, desde 1981, el flujo ultravioleta B ha aumentado en regiones apartadas de los Alpes suizos. ¿Es que los resultados del estudio 1974-85 estaban tergiversados por la contaminación del aire urbano, que suele contener gases y partículas que absorben o difunden los rayos ultravioletas?

Es aquí donde nuestros científicos aficionados pueden prestar una valiosa colaboración. Con poco esfuerzo, el lector podrá construir un radiómetro ultravioleta B que registre, a diario, el flujo de la radiación. Comparando sus observaciones con las de otros de puntos distintos, podría obtenerse una importante información relativa al modo en que la contaminación atmosférica afecta a la radiación ultravioleta B.

Pero antes de acometer la construcción de nuestro radiómetro, es necesario que entendamos de qué manera se propaga la radiación ultravioleta B en el seno de la atmósfera. Parte de los rayos ultravioletas B se difunden en las moléculas del aire; el resto atraviesa directamente la atmósfera. La suma de las radiaciones ultravioletas difundida y directa recibe el nombre de radiación global.

La radiación global reviste gran interés para el estudio de los efectos deletéreos de la radiación ultravioleta, lo mismo en los organismos que en materiales inorgánicos (pinturas y plásticos). Además, las mediciones de la radiación global ayudan a determinar de qué modo las nubes afectan a la radiación ultravioleta B. (Los medidores Robertson-Berger miden la radiación ultravioleta B global.)

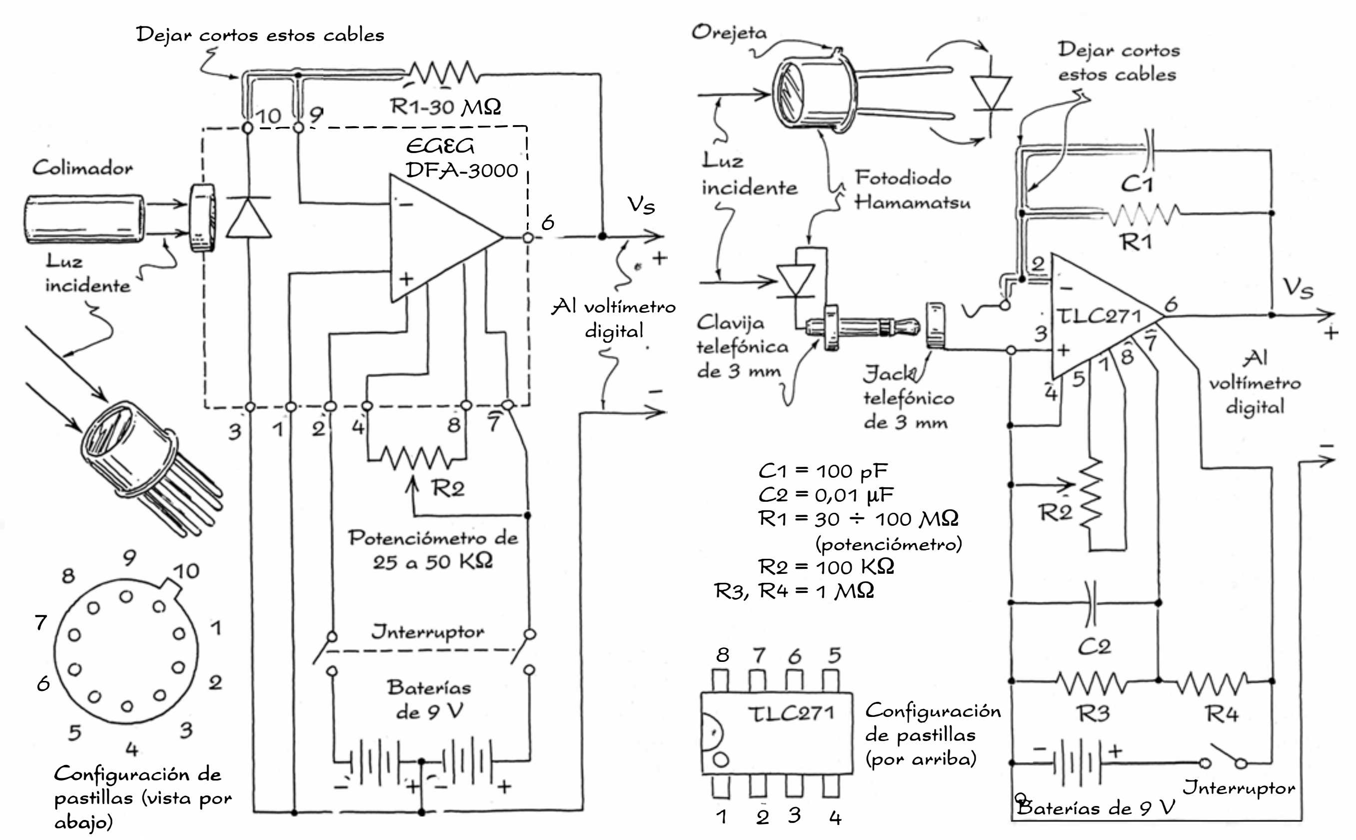
Las mediciones de la radiación ultravioleta directa rinden una información preciosa acerca de la presencia y efectos de los agentes absorbentes y difusores contenidos en la atmósfera terrestre. A causa de la naturaleza impredecible de las nubes, y de la presencia de barreras (edificios y árboles), es preferible, para comparar los efectos de la contaminación sobre la intensidad relativa de la radiación ultravioleta B en dos o más lugares, medir la radiación directa y no la global.

Así pues, ¿deben nuestros aficionados dedicarse a la radiación global o a la directa? He discutido recientemente este tema con John E. Frederick, del departamento de geofísica de la Universidad de Chicago. Frederick ha ideado un modelo para ordenador que predice los niveles de radiación ultravioleta B en la superficie terrestre en muy distintas condiciones. Sugiere que el aficionado se centre primero en la radiación directa, puesto que ésta resulta menos afectada por las múltiples variables que distorsionan las mediciones globales. Por tanto, los dos instrumentos que se describen a continuación se destinan a detectar la radiación ultravioleta B directa.

Un radiómetro ultravioleta B requiere un detector y un dispositivo para seleccionar la longitud de onda a registrar. La señal recogida por el detector se amplifica y se transmite a un voltímetro digital, un registrador analógico o un sistema informatizado de toma de datos.

La longitud de onda puede seleccionarse con un monocromador o con un filtro de interferencia óptica. El primero proporciona un procedimiento práctico, si bien caro, para medir la radiación ultravioleta B a lo largo de una extensa gama de longitudes de onda discretas. El filtro de interferencia óptica ofrece un método mucho más económico y compacto para seleccionar una banda convenientemente estrecha de longitudes de onda ultravioletas B. Los filtros de interferencia, además, dejan llegar al detector una cantidad de radiación considerablemente mayor.

Pero los filtros de interferencia ul-



1. Esquema de conexión del sensor ultravioleta EG&G DFA-3000.

2. Circuito de un radiómetro ultravioleta B ciego al Sol.

travioleta B dejan pasar una banda de longitudes de onda ligeramente más ancha que los monocromadores. Más aún, dejan pasar unos niveles de radiación, pequeños pero detectables, exteriores a las bandas especificadas, los cuales pueden producir errores de medida importantes. De los detectores ultravioletas que eliminan las bandas secundarias del filtro se dice que son ciegos al Sol.

Algunos de los radiómetros que yo he diseñado y montado son ciegos al Sol. Uno de ellos es relativamente fácil de construir porque su detector contiene tanto un filtro de interferencia como un amplificador. Este detector es un DFA-3000 de EG&G Judson (221 Commerce Drive, Montgomeryville, PA 18936). Un detector sencillo cuesta 125 dólares. Un detector calibrado, que importa 75 dólares más, permite tomar mediciones absolutas de radiación ultravioleta B. Pero incluso con un detector sin calibrar podemos registrar las tendencias relativas de la radiación ultravioleta B.

Aunque el detector DFA-3000 simplifica mucho el montaje de un radiómetro, su filtro ultravioleta deja pasar una banda de baja amplitud de luz roja; se encuentra ella mucho más cerca del pico de respuesta espectral del detector que las longitudes de onda ultravioletas a cuya detección se destina el instrumento. Entonces, con el Sol alto en el firmamento, la respuesta roja puede ser el 10 por ciento de la señal del detector. (Luego describiré un método sencillo para corregir tal efecto.)

Los únicos componentes electrónicos necesarios para transformar un detector DFA-3000 en un radiómetro de 300 nanómetros son una resistencia, un potenciómetro (o sea, una resistencia variable) y dos baterías de nueve volt [*figura 1*]. El DFA-3000 contiene un fotodiodo de silicio y un amplificador operacional. Cuando la radiación incide en la superficie activa del diodo, éste genera una pequeña corriente eléctrica. El amplificador transforma la corriente creada en tensión eléctrica, siendo ésta igual al producto de la intensidad de la corriente por la resistencia R1 del esquema.

Como la corriente que genera el fotodiodo puede ser de menos de 10 millonésimas de ampère, R1 debe ser al menos de 10 millones de ohm (o sea, 10 megohm) para que se obtenga una tensión del orden de un volt. Por lo que a mí respecta, para R1 bastan 30 megohm (tres resistencias de 10 megohm conectadas en serie), pero acaso algunos lectores deseen aumentar este valor porque el flujo ultravioleta B es más débil al norte de mi latitud (29 grados 35 minutos, Norte). EG&G Judson sugiere que puede emplearse una resistencia de hasta 200 megohm. Sin embargo, debe tenerse mucho cuidado con las resistencias muy altas, para evitar las señales falsas creadas por las corrientes de fuga entre la patilla de entrada inversora (9) del detector y la tierra (1). Una tenue película de polvo, humedad o grasa puede facilitar un camino para una corriente generadora de errores. Eltec Instruments, Inc. (P.O. Box 9610, Daytona Beach, Florida 32020), fabrica resistencias miniatura de 10 a 100 megohm.

Instalé mi radiómetro en una caja de plástico de bolsillo que compré a Radio Shack (n.º de pieza, 270-291). Si el lector carece de experiencia en el montaje de circuitos electrónicos, encontrará más fácil emplear una caja mayor. Téngase presente que la caja debe ser lo más estanca posible a la luz. La infiltración de luz causaría una señal falsa, ya que la base del detector no sería completamente opaca.

Al haber instalado mi detector en una caja pequeña, me fue necesario incluir un potenciómetro que pudiera ajustar con un destornillador miniatura. Conecté las resistencias al detector con hilo aislante, arrollando éste en torno a las patillas de los componentes con un útil especial para

alambres muy delgados. Si se prefiere, se suelden alambres normales a las patillas de los componentes. Importa que se mantengan cortas y directas las conexiones entre la entrada al amplificador (patilla 9), el fotodiodo (patilla 10) y R1. Para establecer la conexión eléctrica con las baterías de nueve volt, se empleará un par de pinzas de contacto. Antes de conectar las baterías al circuito, hay que revisar cuidadosamente el montaje.

Mi instrumento dispone de un par de cables de salida dotados de tomas que reciben las sondas de un multímetro digital miniatura. Puede que alguien prefiera instalar el radiómetro y un voltímetro digital juntos en una caja mayor.

Como el radiómetro está destinado a medir la radiación directa procedente del Sol, hace falta un colimador que limite el campo visual del detector. Para ello puede servirnos perfectamente un trozo de tubo de latón de pared fina. Este tubo debe tener un diámetro exterior de un centímetro e insertarse por fuera del detector. Si éste encaja con excesiva holgura en el tubo, arróllese una capa de cinta. El interior del tubo se cubre de esmalte negro mate. Un tubo de unos noventa milímetros de largo dejará un campo visual de aproximadamente cuatro grados cuando lo empujemos hasta el final, contra la base del detector.

Antes de instalar el colimador, hay que limpiar la superficie del filtro, puesto que el polvo y la grasa absorben la radiación ultravioleta B. Las huellas dactilares se eliminan frotando la superficie del filtro con alcohol etílico y quitando los residuos con papel limpialentes. Soplaremos el polvo con aire comprimido limpio.

El radiómetro así montado es fácil de utilizar. Primero, mírese por el colimador. Si vemos el reflejo de nuestra pupila, es que el detector está bien centrado. Si no, realinearemos el tubo. Tras conectar el voltímetro y cerrar el interruptor de alimentación, se tapa la boca del tubo y se ajusta el potenciómetro hasta que sea nula la tensión de salida. (Estas maniobras se repiten antes de cada tanda de mediciones.) Seguidamente se apunta el tubo hacia el Sol y se alinea hasta que desaparezca su sombra. Tendremos entonces el detector encarado directamente al astro. Anotemos la tensión y hagamos otra medición. No tardaremos mucho en descubrir que, incluso en los días despejados, la intensidad de la señal fluctúa, a veces bastante, particularmente en torno al mediodía y siempre que la atmósfera esté oscurecida por nubes, humo o polvo.

Las lecturas están afectadas de un error sistemático, debido a que el detector reacciona a la luz roja que deja pasar el filtro. Podemos eliminar ese error sin más que hacer, tras cada lectura, otra lectura durante la cual obstruyamos los rayos ultravioleta colocando un filtro en la boca del colimador. Para esto nos bastará con un filtro ultravioleta fotográfico, tal como el WG-345 que es de vidrio diáfano.

Si trabajamos con un detector sin calibrar, restaremos la segunda lectura (B) de la primera (A) para obtener una tensión eléctrica que será correcta con respecto a las medidas tomadas en otros momentos.

Si trabajamos con un detector calibrado, podemos calcular la irradiancia espectral absoluta para 300 nanómetros en watt por metro cuadrado. Es característico de los filtros de bloqueo ultravioleta que reflejen del orden del ocho por ciento de la radiación no ultravioleta incidente. Por tanto, esta última será sin el filtro aproximadamente igual a la lectura B dividida por 92 por ciento. Como la superficie activa del DFA-3000 es de unos 9,9 milímetros cuadrados, la señal del detector debe multiplicarse por 101.000 para hallar la señal por metro cuadrado. La fórmula resultante es

$$\frac{A - (B/0{,}92)}{R1 \times Dr} \times \frac{101.000}{F}$$

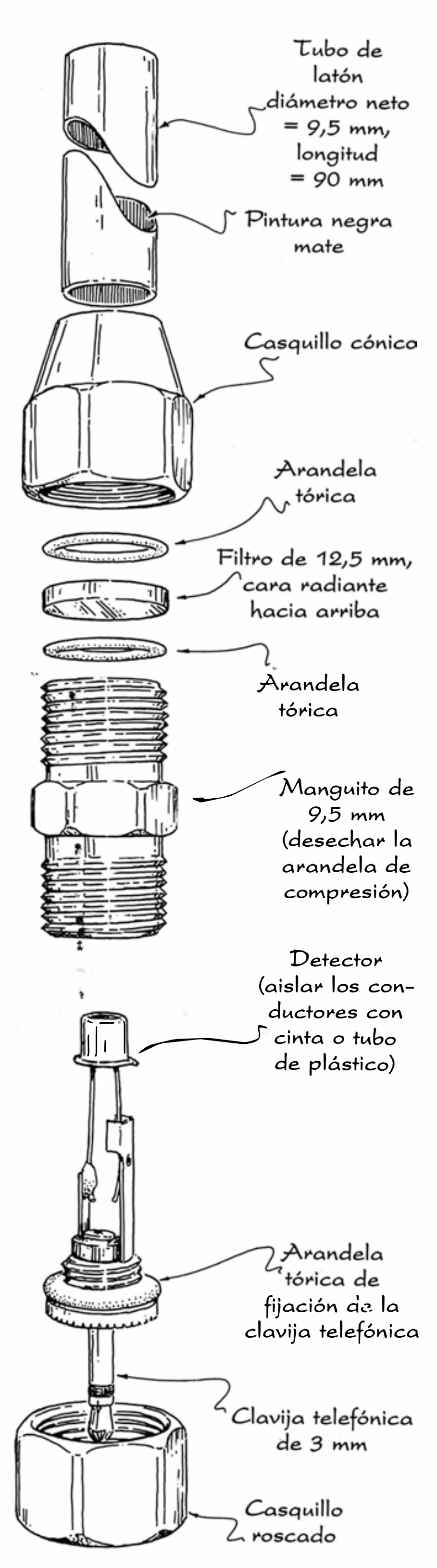
donde Dr es la sensibilidad ("responsividad") calibrada del detector y F es la banda pasante del filtro. (Se llama banda pasante al número de nanómetros comprendidos entre los puntos para los que la transmisión del filtro desciende a la mitad del máximo.) Un filtro ideal tendría una banda pasante de menos de un nanómetro, pero los filtros reales poseen unas bandas pasantes más anchas.

Mi detector tiene una responsividad de 0,04 ampère por watt y un filtro con una banda pasante de 10,4 nanómetros. Lecturas representativas de un día claro de agosto son 1,50 (A) y 0,116 volt (B). Introduciendo estos valores en la fórmula, tendremos

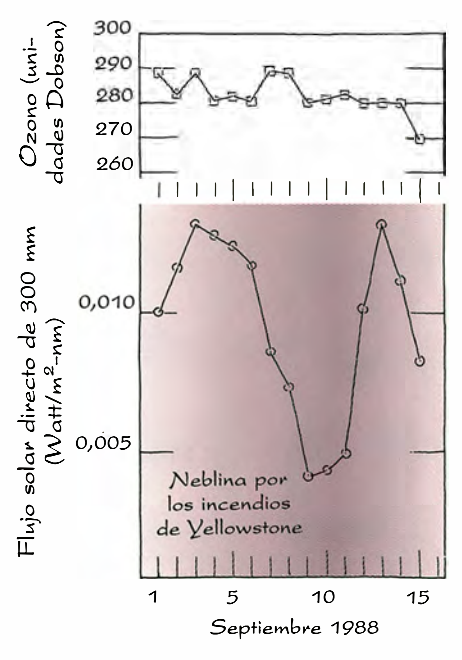
$$\frac{1{,}50 - (0{,}116/0{,}92)}{30.000.000 \times 0{,}04} \times \frac{101.000}{10{,}4}$$

o sea, 0,011 watt por metro cuadrado por nanómetro. Recuérdese que estamos hablando de radiación ultravioleta directa. A mi latitud, la contribución de la radiación difundida por las moléculas de la atmósfera añade al menos un treinta por ciento a este valor.

Para resolver la fórmula, podemos redactar un programa de ordenador. Mejor aún sería programar una hoja de análisis informática combinada con la fórmula, introducir hora y fecha, representar gráficamente las medidas y archivar las hojas.



3. Instalación de un detector en un manguito de empalme de latón.



4. Observaciones de la radiación ultravioleta solar.

Podemos construir también un radiómetro ultravioleta B basado en un diodo de fosfuro de galio. Estos detectores, a diferencia de los fotodiodos de silicio, no reaccionan a la luz roja, por lo que son verdaderamente ciegos al Sol. Hamamatsu Corporation (P.O. Box 6910, Bridgewater, NJ 08807) fabrica diodos de fosfuro de galio. El G1961 (27,45 dólares, más gastos de envío e impuestos) está alojado en una cápsula TO-18 y tiene una superficie eficaz de 1,0 milímetro cuadrado. El G1962 (35 dólares) se aloja en una cápsula TO-5, que es mayor y su superficie eficaz es de 5,2 milímetros cuadrados.

En los radiómetros ciegos al Sol, el componente más caro es el filtro óptico. Barr Associates (P.O. Box 557, Westford, MA 01886) fabrica filtros de alta calidad, pero sólo bajo pedido de clientes. Por consiguiente, salvo que el lector esté relacionado con alguna institución que tenga la posibilidad de hacer ese pedido, habrá de recurrir a otro proveedor.

MicroCoatings (One Lyberty Way, Westford, MA 01886) fabrica un filtro de 12,5 milímetros de diámetro que transmite la radiación de 300 nanómetros y tiene una banda pasante de 10 nanómetros (n.º de catálogo, ML3-300). Su precio es de 77 dólares, cantidad muy aceptable para un filtro de interferencia. Con las mismas especificaciones, Twardy Technology, Inc., vende por 210 dólares un filtro de 25 milímetros de diámetro.

Para construir un radiómetro ciego al Sol, es importantísimo instalar el detector y el filtro en un alojamiento estanco a la luz. Quien tenga acceso a un taller mecánico, puede construirse uno. Si no, podrá instalar un filtro de 12,5 milímetros en un adaptador de conexión de latón o manguito de empalme [*figura 3*]. Este y las arandelas tóricas necesarias podrán encontrarse en ferreterías o tiendas de fontanería. En uno de los casquillos del manguito se introduce una clavija telefónica de dos conductores y ésta se asegura en posición con una arandela tórica de caucho. Los cables del detector se insertan en el zócalo de un diodo emisor de luz soldado a los terminales de la clavija. El detector puede soldarse directamente a los terminales. El cable catódico debe soldarse al terminal común de la punta de la clavija. En uno y otro caso, hay manguitos que sólo admiten detectores en cápsulas miniatura TO-18.

El filtro, protegido por un par de arandelas tóricas, se instala en el otro casquillo. Si éste es cónico, sería mejor, pero resultará quizás algo difícil de encontrar. Si el filtro y las arandelas no dejan espacio suficiente para que la rosca de este casquillo penetre en la del manguito, se cambia una de las arandelas tóricas por un separador de papel. Se atornilla entonces ese casquillo hasta dejarlo en su lugar, pero no de forma que oprima el filtro. Si es necesario, el casquillo puede fijarse con una gota de un pegamento eliminable. Vigílese que el filtro permanezca limpio durante la operación de montaje.

Según las dimensiones del detector, un casquillo cónico nos dará un campo visual de unos 10 grados. Por tanto, tendremos que fijar un tubo colimador a la abertura del casquillo, al objeto de reducir el campo visual a cuatro grados o menos. Emplearemos tubo de latón que podremos soldar o pegar a la abertura. El interior del tubo lo cubriremos de pintura negra mate.

Los conjuntos filtro-detector los guardo en un recipiente de plástico para frigorífico, estanco al aire, acompañado de dos paquetes de silicagel desecante. Este producto ayuda a proteger los filtros del deterioro producido por la exposición prolongada a vapor de agua. Podemos conseguir esas bolsas en farmacias y tiendas de electrónica o fotografía.

Como los radiómetros ciegos al Sol comprenden un detector, un filtro y un amplificador separados, son de montaje más difícil que cualquier instrumento en que estos componentes se combinen en un solo conjunto. No obstante, su circuito es funcionalmente igual al del primero de los instrumentos que hemos tratado, tal como puede apreciarse en la figura 2.

Una ventaja importante de estos radiómetros es que consumen muy poca corriente. Porque pueden ser alimentados por una sola pila de nueve volt, fácilmente se acomodan en una caja compacta, del estilo de la 270-257 de Radio Shack. El amplificador operacional que se especifica en el esquema de circuito de la figura (TLC271CP) puede comprarse en cualquier distribuidor de electrónica o bien a Texas Instruments (P.O. Box 225012, Dallas, TX 75265). Pueden también emplearse otros amplificadores operacionales, siempre que su corriente de polarización de entrada sea muy baja. Consúltese la hoja de datos del fabricante, puesto que las conexiones quizá sean diferentes.

La electricidad estática daña el TLC271CP. No hay que tocar, pues, las patillas al instalarlo. Esta dificultad se evita soldando al circuito una plaqueta de circuito impreso para ocho patillas. En la plaqueta se inserta el amplificador operacional después de montar el circuito, pero antes de alimentarlo con corriente.

El radiómetro ciego al Sol funciona casi como el otro instrumento, salvo que su lectura no desciende por debajo de cero, puesto que el circuito es alimentado por una única pila. Por tanto, se ajustará el potenciómetro hasta que la lectura sea cero con el colimador tapado. La fórmula para el detector DFA-3000 nos ayudará a calcular la intensidad ultravioleta. El fabricante del filtro debe facilitar la longitud de onda de transmisión y la correspondiente transmisividad porcentual. En la información de Hamamatsu figura la superficie del detector y una gráfica de la sensibilidad en función de la longitud de onda.

La medición regular de la radiación ultravioleta B procedente del Sol con un detector, calibrado o no, puede proporcionar datos importantes. Trátese siempre de hacer las mediciones en el mediodía solar. Para determinar éste, puede consultarse cualquier patrón astronómico o un reloj solar.

El máximo de radiación ultravioleta B raramente se presenta en el mediodía solar, sino que la señal fluctúa de manera constante, ya que la radiación de 300 nanómetros se ve atenuada y difundida por la atmósfera y sus gases componentes. Por esta razón, dejaremos pasar al menos cinco minutos entre medición y medición.

Casi cada día, durante dos años, he venido midiendo el flujo solar directo para cuatro longitudes de onda ultravioleta B y seis longitudes de onda

más. Así he descubierto que la niebla, la neblina, las nubes y las estelas de condensación de los aviones atenúan fuertemente la irradiancia solar directa a 300 nanómetros. Durante el verano de 1988, observé que la radiación ultravioleta B decrecía cuando el humo debido a los incendios del Parque de Yellowstone vagaban a la deriva por el cielo de Texas.

El paso de un frente frío, hecho que eleva la presión barométrica, va casi siempre seguido de una reducción en la radiación ultravioleta B, aun cuando la atmósfera esté excepcionalmente límpida y seca. Los datos de los satélites artificiales y mis mediciones diarias del ozono confirman que este fenómeno lo causa un aumento de dicho gas de hasta el 15 por ciento y, a veces, más. Una presión barométrica baja, al menos en el centro de Texas, donde yo vivo, suele ir acompañada de una caída de ozono. Así, cuando el huracán Gilbert pasó por aquí cerca en septiembre de 1988, mi radiómetro registró un incremento importante en radiación ultravioleta B al hacerse visible el Sol. Varias semanas después, un paquete de informes procedente de Arlin Krueger, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard, revelaban un descenso acusado, y simultáneo, del ozono.

Puede que mis observaciones no sean válidas para el lugar de residencia del lector, lo cual ya es razón suficiente para que realice sus propias mediciones. Por ejemplo, ¿podría el lector explicar y medir el aumento de radiación ultravioleta B que produce la nieve, o la disminución que producen los incendios de pastizales o un frente de inestabilidad atmosférica que se acerque rápidamente? Si el lector mide para dos longitudes de onda muy poco separadas, podrá calcular el ozono comprendido en una columna atmosférica.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BIOLOGICALLY EFFECTIVE ULTRAVIOLET RADIATION: SURFACE MEASUREMENTS IN THE UNITED STATES, 1974 TO 1985. Joseph Scotto et al. en *Science*, vol. 239, n.° 4841, Parte 1, págs. 762-764; 12 de febrero de 1988.

THE BUDGET OF BIOLOGICALLY ACTIVE ULTRAVIOLET RADIATION IN THE EARTH-ATMOSPHERE SYSTEM. John E. Frederick y Dan Lubin en *Journal of Geophysical Research*, vol. 93, n.° D4, págs. 3825-3832; 20 de abril de 1988.

INDICATION OF INCREASING SOLAR ULTRAVIOLET-B RADIATION FLUX IN ALPINE REGIONS. Mario Blumthaler y Walter Ambach en *Science*, vol. 248, n.° 4952, págs. 206-208; 13 de abril de 1990.

Juegos matemáticos

Sofá de Conway y área máxima del contorno que puede doblar el ángulo de un pasillo

Ian Stewart

La familia Verme se había instalado en la nueva y cómoda galería unifamiliar adosada. Archibald, en particular, se sentía en insólita paz con el mundo, tras haber podido ¡al fin! persuadir al contratista de que terminase de alicatar el cuarto de baño [véase *Pavimentos y teselaciones*, "Juegos matemáticos", INVESTIGACION Y CIENCIA, julio de 1990]. Hacía días que su esposa Maud no le daba la tabarra; si a Archibald lo hubiesen dejado en paz, su felicidad hubiera sido completa enroscado en el sofá de la sala, con la cola bien apoyada en la mesita de las revistas y dividiendo su tiempo entre la lectura de su periódico favorito *Ver-Mundo* y los partidos de la tele.

Aunque Archibald raramente disfrutaba de tanta paz.

Hoy, sin embargo, era una excepción. Maud había ido de compras, llevando consigo a la pequeña Vermencita, para regalarle unos leotardos nuevos. El se había hecho un ovillo en su sofá favorito, que al cabo de veinte años se moldeaba a su cuerpo como una segunda piel, y había podido dedicarse a la dulce molicie.

"¡Archibald! Archibald, ¿dónde estás? ¡Claro, no podía fallar, zangoliteneando! Archibald, hay una venta especial en *Carcomueble*, ya sabes, esa tienda de mobiliario a medida."

"Sí, amor mío. Es una noticia formidable", dijo Archibald sin gran convicción. Sabía ya por dónde vendrían los tiros.

"¡Sería una ocasión *excelente* para cambiar este sofá tan horrible que tenemos!"

Dos caminos se abrían ante Archibald. Uno, aceptar de grado el cambio de sofá. El otro, armar una bronca de antología y *después* cambiar de sofá. Archibald, que no tenía mucho de optimista, pero sí de optimalista, no tardó en percatarse de la solución que optimizaría su paz espiritual. "Claro que sí, mi vida. Voy a encargar uno enseguida. ¿De qué color lo prefieres?"

"Lo quiero de color verde lima con lunares violeta", dijo Maud, "para que haga juego con las listas amarillas y naranjas de la alfombra y con el empapelado, que es azul turquesa con margaritas rosadas. ¡Pero, Archibald, lo verdaderamente importante no es el color, sino la *forma*!"

"¿Y de qué forma lo quieres, cielo? Yo propondría algo con forma de sofá, aunque, claro..."

"¡Eso, Archibald, no depende de mí! Mira, yo quisiera un sofá bien grande; ya sabes lo estrechos que estamos cuando viene mamá a visitarnos." ("Otro astuto plan que acaba de irse por el desagüe", pensó Archibald.) "Pero acuérdate del lío que tuvimos con los operarios de la mudanza para que metieran el piano de cola en el cuarto de colada."

Archibald tenía fresco el recuerdo de aquel incidente. Al final acabaron echando abajo un tabique y desmantelando el piano. La máquina de lavar quedó entronizada encima del instrumento y la secadora, debajo de él, tumbada sobre un costado. El detergente se guardaba en el hueco del taburete del piano. Lo que le resultaba totalmente imposible era recordar por qué había querido Maud instalar el piano en el cuarto de colada.

"Lo que yo quiero, prosiguió Maud, es un sofá lo bastante grande como para poder acurrucarnos todos en él, pero cuya forma permita hacerlo pasar por el pasillo hasta el comedor."

La tendencia optimizadora de Archibald le metió en camisa más larga que la proverbial de once varas. "Entonces, querida esposa, la forma que buscas es la que permita la maniobra por el pasillo del *sofá máximo* hasta el come-acurrucador. Que yo recuerde, la única dificultad seria es que el pasillo tiene un codo en ángulo recto." [*Véase la figura 1.*]

"Una idea brillante, Archibald. ¿Y cuál habría de ser, a tu juicio, esa forma de superficie máxima?"

"No tengo ni idea, palomita, pero estoy seguro de que existe, y voy a averiguarla para ti."

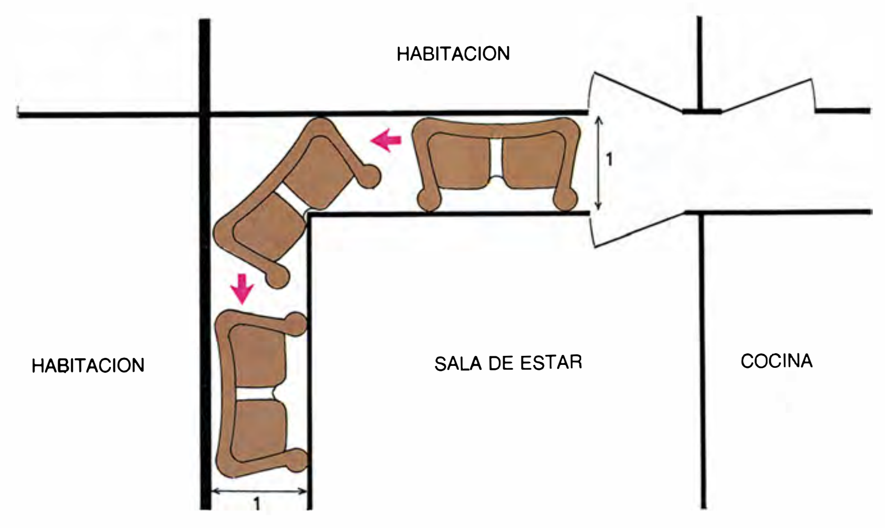
Transcurrieron varios días.

"¿Todavía no la has averiguado, Archibald? ¡La oferta termina este fin de semana!"

"Verás, Maud... no lo he resuelto de forma completamente exacta. Sé resolver el problema imponiendo la condición adicional de que el sofá no gire para nada. Tomando como unidad la anchura de nuestro pasillo, es fácil ver que el sofá máximo que puede pasar por el ángulo es el cuadrado unidad." [*Véase la figura 2.*]

"¡Pero, Archibald, eso no es un sofá, eso es una mesa!"

"Tienes razón, sí. Me pareció que si se permitía que el sofá girase un ángulo, quizá fuera posible hacer pasar por el rincón un cuerpo algo mayor. Mi siguiente idea fue usar un rectángulo más largo y estrecho, y hacerlo girar en ángulo recto al pasar por la



1. El sofá ha de pasar por un codo en ángulo recto de un pasillo de anchura 1 unidad. ¿Qué silueta ha de tener el sofá para que su área sea máxima?

esquina, pero así no se logra mejora alguna." (*¿Por qué no? ¿De qué forma y tamaño es el rectángulo de área máxima que puede pasar por el ángulo mientras se le hace girar un ángulo recto?*)

"El primer resultado de interés que obtuve fue que el diámetro de cualquier sofá conexo está acotado... Lo que quiero decir, pimpollo, es que cualquier objeto que sea de una pieza y pueda pasar por el ángulo del pasillo no podrá exceder de cierto tamaño máximo; concretamente, la mayor de sus dimensiones no puede pasar de $2 + 2\sqrt{2} = 4{,}8284$ [*véase la figura 3*]. Lo cual implica inmediatamente que su área no podrá ser mayor que la del círculo de ese mismo diámetro, a saber, $\pi(3 + 2\sqrt{2})^2 = 18{,}3105$; pero pensando un poco más rápidamente mejoré este resultado a $2\sqrt{2} = 2{,}8284$." (*¿Ve el lector cómo establecer esta cota superior para el área?*)

"Creí después haber hecho un avance importante", dijo Archibald con un ligero timbre de ufanía en la voz, matizado de pesar. "Se me ocurrió que, si recortase hacia adentro la parte del sofá que roza contra la arista del rincón, podría darle mayor área. Estuve tanteando con la clase general de formas que vemos en la figura 4: dos cuadrantes de radio unidad separados por un rectángulo, al que se le vacía un semicírculo. Sin más que elegir para el rectángulo la longitud correcta L, logré más que duplicar el área y llevarla hasta 2,2074." (*Entre las siluetas de esta clase, ¿qué valor de L da área máxima para un sofá capaz de rodear la esquina? ¿Cuánto vale este área, exactamente?*)

"Humm.", murmuró Maud. "No resulta un sofá nada feo, Archie."

"No, no es feo. Pero después me he dado cuenta de que no es optimal."

"¿Por qué no?"

"Porque si se recortan unas piezas pequeñas en los extremos del semicírculo, se pueden engrosar los cuadrantes y ganar más de lo que se pierde [*véase la figura 5*]. Los cálculos se embrollan un poco, pero desde luego puedo conseguir un área de 2,2164. De todas formas, ese valor tampoco me parece que sea optimal."

"Es decir: te has atascado."

"En una palabra: sí."

"Pues, Archie, más vale que te desatasques. ¡Quiero un sofá nuevo y lo quiero lo más grande que pueda ser! ¡Me niego en redondo a soluciones a medias!"

"Sí, mi vida", asintió Archibald con resignación. "Ya sé, haré como siempre... Voy a consultar con Albert Vermenstein."

Vermenstein, que por alguna oscura razón trabajaba en el Registro de Patentes, parecía saberlo todo. Pronto le daría a Archibald la solución...

"Te has metido en un buen lío", dijo Vermenstein. "Has desenterrado un hueso viejo, y de los duros de roer. Ni siquiera se sabe a quién se le ocurrió el problema. Desde luego, John Horton Conway lo planteó en los años sesenta, pero probablemente sea muy anterior. En aquel entonces, el objeto a mover era un piano, pero en vista del evidente isomorfismo piano-sofá, me parece que podemos concluir que el piano optimal ha de tener la misma forma que el sofá optimal. La primera referencia publicada de que tengo noticia se debe a Leo Moser, en SIAM *Review*, y es de 1966. La forma que tú has encontrado [*figura 4*] fue publicada al poco por Hammersley, quien conjeturó que podría ser optimal. Pero en una reunión sobre teoría de convexidad celebrada en Copenhague, un grupo de siete matemáticos, entre quienes se contaban Conway, G. C. Shephard y posiblemente Moser, hicieron un estudio informal del problema. De hecho, trabajaron en siete variaciones distintas... ¡una de cada uno!" (*Vemos dos de ellas en la figura 6: quizá los lectores gusten de analizarlas por sí mismos.*)

"Y enseguida demostraron que la solución de Hammersley no es optimal, de forma parecida a como hiciste tú."

"¡Ah!"

"Desventuradamente, tampoco ellos lograron encontrar la forma óptima."

"¡Pues qué bien!"

"El problema ha estado abierto desde entonces, sin que nadie haya publicado todavía una solución."

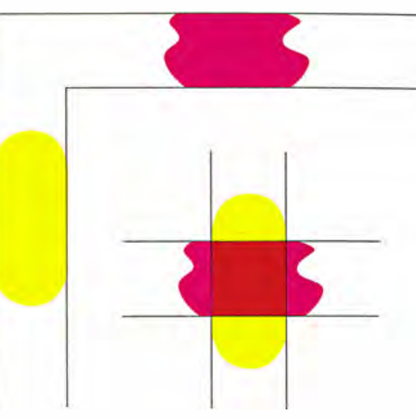
"¡Vaya por Dios!"

"Lo siento, Archie, viejo amigo, pero no puedo ayudarte."

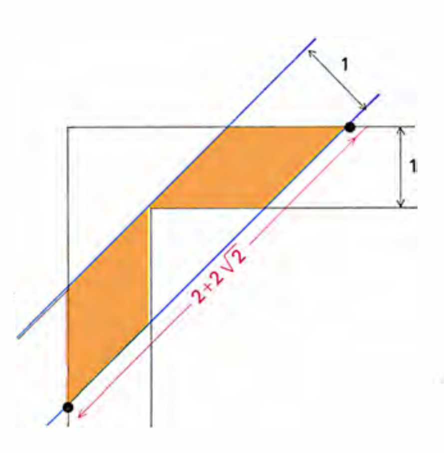
Archibald se arrastró cabizbajo hasta su casa, aprestándose a afrontar las iras de Maud. Cuando llegó a su domicilio, su esposa estaba hecha unas mieles.

"¡Mira qué leotardos tan bonitos le he comprado a Vermencita! ¡Toda la semana buscándolos, y por fin los he encontrado en las oportunidades de Lombriprica! ¡Y a menos de la mitad de su precio! Esas rayas amarillas y negras, como de cebra, la hacen parecer muy esbelta, ¿no crees? Le he comprado seis docenas. ¡Ah, sí, y ha llamado ese señor... Vermenstein. Me ha dicho no sé qué de noticias importantes sobre el sofá."

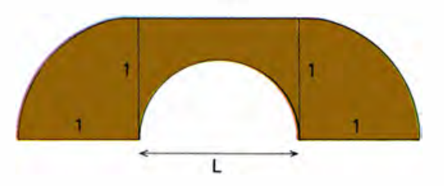
Archie se apresuró a telefonear a Albert.



2. Si fuese imposible hacer girar el sofá, su área máxima sería la de un cuadrado unitario: 1. El sofá debe encajar entre las horizontales (en rojo) *y entre las verticales* (en amarillo). *La superficie máxima que cumple estos dos requisitos es su intersección* (color naranja).



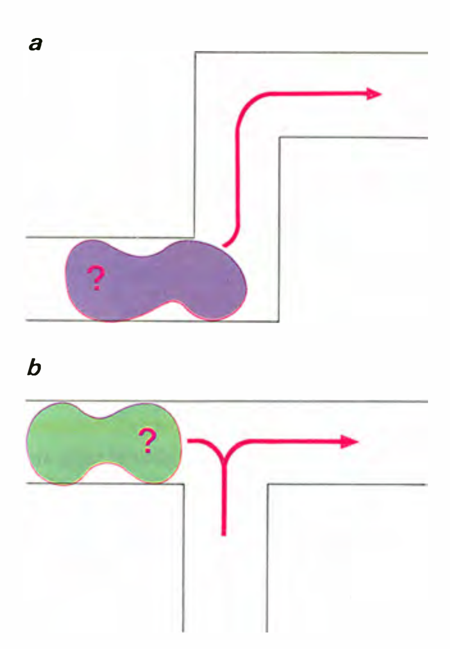
3. Cuando el sofá ha girado 45 grados, tiene que encajar a la vez en el pasillo (en negro) *y en una franja de anchura unidad paralela a las rectas de azul. La región anaranjada se escindiría en dos si las líneas azules bajasen más; la posición da el diámetro máximo posible, $2 + 2\sqrt{2}$.*



4. El sofá de Hammersley. Añádase un cuadrante de lado unidad a cada extremo de un rectángulo de $1 \times$ L y recórtese de éste un semicírculo. ¿Qué valor de L *proporcionará área máxima, sabiendo que el sofá ha de franquear la esquina?*



5. Mejora del área del sofá de Hammersley. La superficie adicional (verde) *es mayor que los trocitos recortados.*



*6. Dos variantes del problema del sofá: (*a*) el piano de Shephard, capaz de franquear dos esquinas; (*b*) el coche de Conway invierte la marcha entrando en la calle lateral.*

"Sí, Archie, noticias maravillosas, con la tinta fresca. Acabo de enterarme de que Joseph Gerver, un matemático de la Universidad de Rutgers, ha resuelto el problema del sofá de Conway. Bueno, en este momento su demostración tiene todavía unas cuantas lagunas... si yo estuviera en tu caso no le diría nada a Maud... pero sus razonamientos son todos muy plausibles, y creo que se puede apostar sobre seguro que su solución es correcta."

"¿Qué forma tiene?", quiso saber Archie.

"Muy notable. No se diferencia demasiado de la solución de Hammersley, pero sí es más sutil. Su contorno consta de dieciocho piezas distintas [*véase la figura 7*], cada una de las cuales posee su propia expresión analítica. Y el área es 2,2195, lo que perfecciona el resultado de Hammersley en un 0,5 por ciento, y al mejor de los tuyos en un 0,14 por ciento."

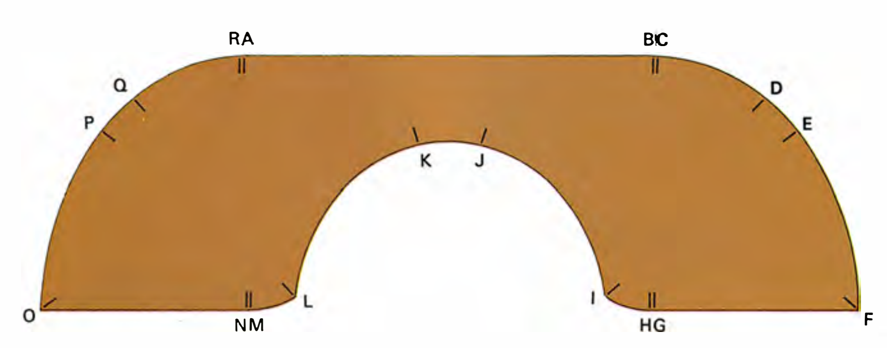
"¿Me estás diciendo que Maud me ha vuelto loco toda una semana por unas miserables 14 centésimas de uno por ciento?"

"Pues sí, Archie. Pero recuerda: ¡la exactitud es uno de los principios fundamentales de las matemáticas!"

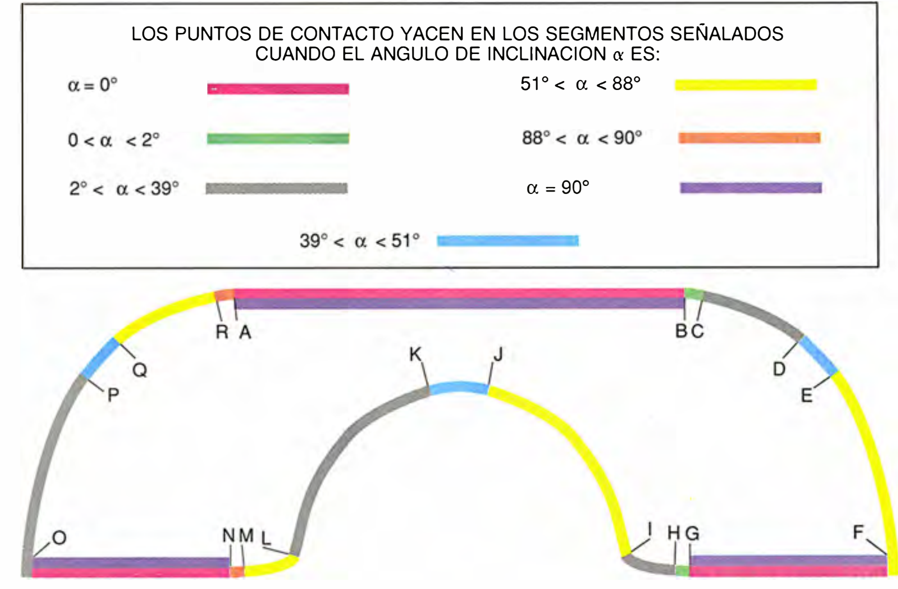
Archibald volvió rápidamente a casa de Albert, quien le proporcionó casi todos los detalles. No entraré aquí en los aspectos más técnicos, pero sí procuraré dar una idea del razonamiento y de cuáles son las lagunas por rellenar. No obstante, veamos primero lo que sucede cuando el sofá de Gerver ha de rodear la esquina [*véase la figura 9*]. Describiremos el proceso en función del ángulo α que ha girado el sofá. Se comienza con $\alpha = 0$ y se desplaza el sofá hacia la izquierda hasta *casi* tocar (pero no del todo) la pared exterior izquierda. Después pivota tocando las paredes de la derecha en sólo dos puntos [*flechas rojas de la figura 9a*] y sin tocar para nada a las otras paredes, inclinándose levemente hasta que α es justo un poquitín más de 2 grados. Al terminar esta fase, el sofá hace contacto con la pared exterior izquierda y su curva interior está tocando la arista del codo del pasillo; así, mientras α se mantiene entre unos 2° y unos 39°, el sofá toca a las paredes exactamente en cuatro puntos [*véase la figura 9b*]. Cuando el ángulo α crece desde 39° hasta 45°, se pierde el contacto del extremo derecho inferior [*véase la figura 9c*] y el sofá contacta con las paredes en sólo tres puntos. La secuencia desde los 45° a los 90° es la misma, aunque en orden contrario, por la simetría del sofá y del pasillo. La figura muestra qué arcos del contorno del sofá están tocando las paredes para los distintos valores del ángulo de inclinación α.

Tenemos una *descripción* de la solución, francamente sutil; pero esta descripción no nos explica cómo fue gestada. Gerver ha ideado una explicación clara, pero complicada. (Asistí a un seminario que impartió en la Universidad de Warwick y tomé notas; Gerver ha tenido la amabilidad de permitir que su trabajo fuese publicado aquí.) Aunque la explicación de Gerver conduce directamente al contorno mostrado y a la secuencia de movimientos recién descrita, contiene por el momento cierto número de presunciones no demostradas.

La primera de dichas presunciones es que la figura gira un ángulo recto al rodear la esquina. Con toda verosimilitud así ha de ser; pero la demostración está resultando increíblemente escurridiza. Sea cual fuere el ángulo que realmente haya girado, el contorno ha de encajar en el corre-



7. La solución de Gerver. Las letras señalan en qué puntos de la frontera cambia el tipo de curva requerida.



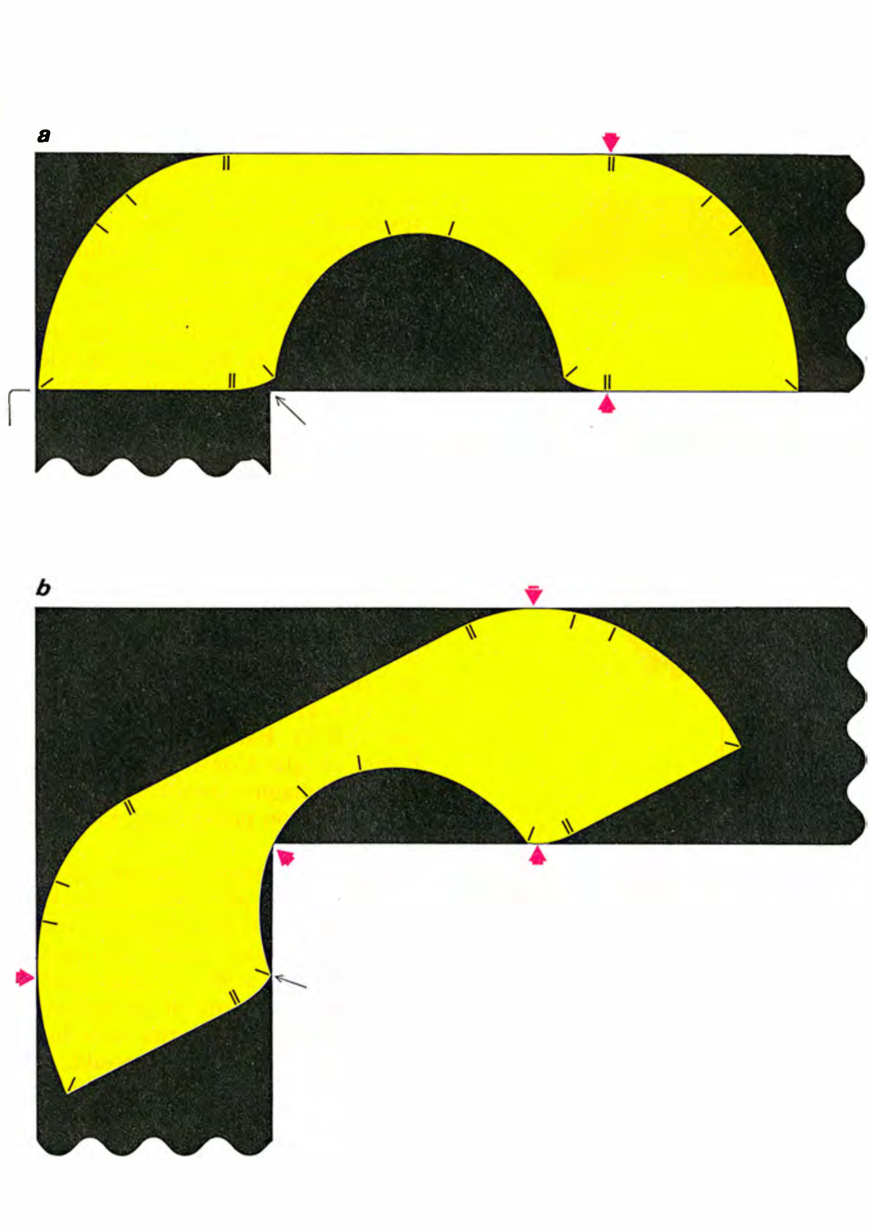
8. Ubicación y ángulo de los puntos de contacto del sofá al doblar la esquina.

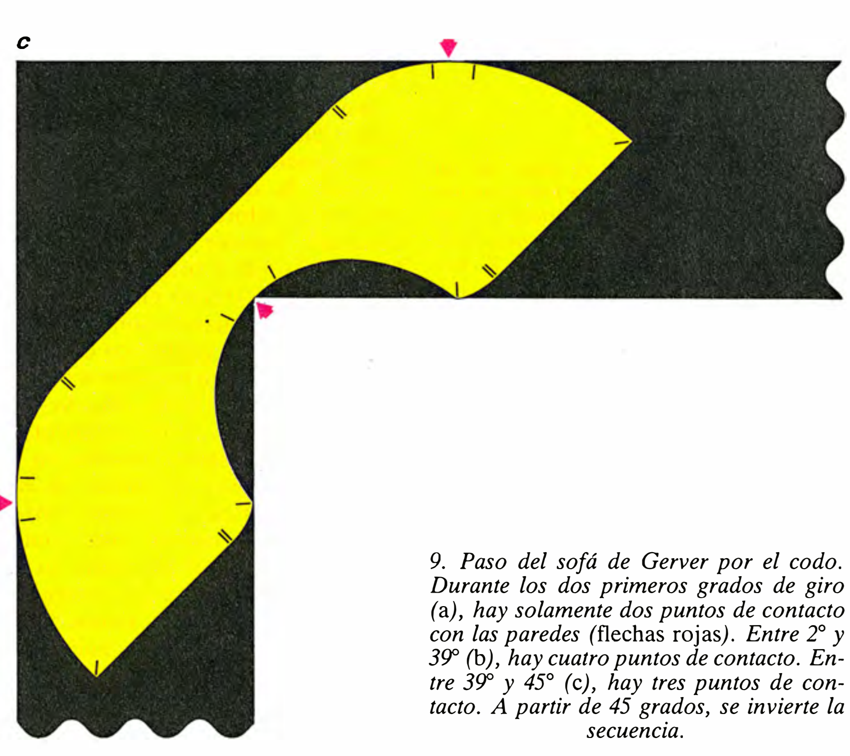
dor para todos los ángulos de inclinación α. El primer paso consiste en demostrar la recíproca: que cualquier contorno que encaje en el pasillo para todo ángulo de inclinación α comprendido entre 0° y 90° puede realmente rodear la esquina. Este hecho *no* es obvio, porque la posición en que encaja podría no depender continuamente del ángulo. Resulta posible, sin embargo, establecer dicha continuidad insertando el sofá en un ángulo α y desplazándolo después paralelamente a sí mismo lo más hacia arriba y hacia la izquierda que sea posible.

Zanjada esta cuestión, resulta posible (y a veces conveniente) volver el problema del revés: ¡dejamos fijo el sofá y hacemos girar el pasillo! Dibujemos, para cada valor de α comprendido entre 0° y 90°, una copia del pasillo girado dicho ángulo; tal figura será llamada un α-pasillo. Lo que queremos es maximizar el área común a todas estas copias (su *intersección*) desplazándolas sin hacerlas girar, esto es, por pura *traslación*. La siguiente presunción no demostrada, igualmente muy plausible, es que cualquier solución optimal puede ser aproximada tan de cerca como se quiera por la intersección de un número finito de estos pasillos trasladados. Tal aproximación constituye un polígono de gran número de lados, similar al de la figura 10.

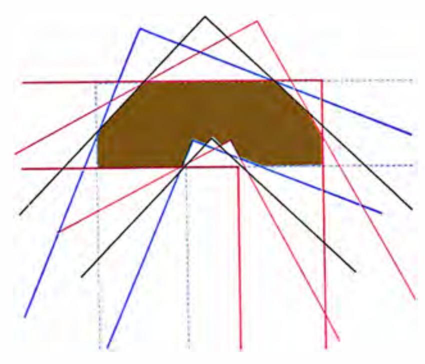
Uno de estos polígonos hará contacto con el α-pasillo a lo largo de cierto número de lados. Supongamos que, para tales lados, la suma de las longitudes yacentes sobre el borde exterior del pasillo es mayor que la suma de las longitudes que contactan con el borde interior. En tal caso, el área del polígono se podría aumentar recortándole una fina tirita por el lado interior y añadiéndole otra, de espesor idéntico, por el lado exterior [*véase la figura 11*]. Si la suma de las longitudes en contacto con el borde exterior fuese menor que por el interior, se procedería análoga e inversamente. Se concluye que, en cualquier polígono aproximador óptimo, las dos sumas han de ser iguales, cualquiera que sea el ángulo α.

Para poder hacer una afirmación similar para el sofá en lugar de para la aproximación poligonal, pasamos al límite haciendo tender a infinito el número de lados. Para enunciar el resultado nos es precisa la noción de *radio de curvatura* de una curva en un punto, que es el radio del círculo que mejor se ciñe a ella. Una línea recta tiene en todos sus puntos radio de

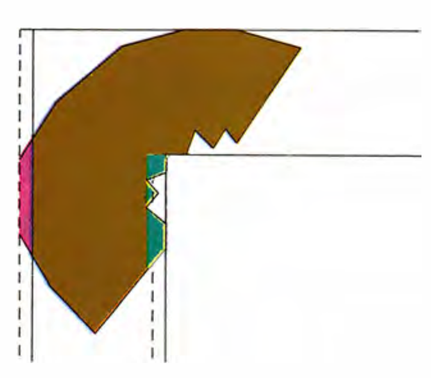




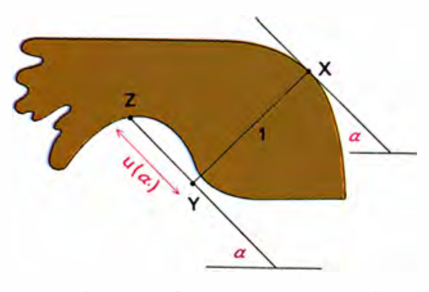
*9. Paso del sofá de Gerver por el codo. Durante los dos primeros grados de giro (*a*), hay solamente dos puntos de contacto con las paredes (*flechas rojas*). Entre 2° y 39° (*b*), hay cuatro puntos de contacto. Entre 39° y 45° (*c*), hay tres puntos de contacto. A partir de 45 grados, se invierte la secuencia.*



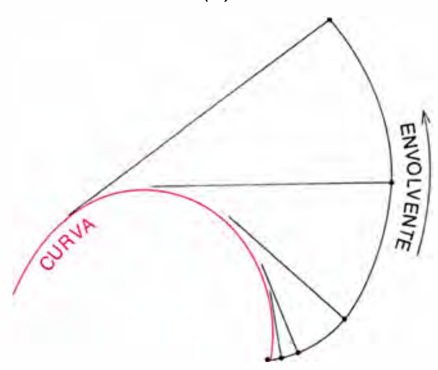
10. Una aproximación poligonal de un sofá óptimo.



11. Región de frontera exterior mayor que la interior. Si los lados rojos midieran más que los verdes, se podría aumentar el área añadiendo una fina franja roja y eliminando una verde. Imaginemos que todo el pasillo se corre un poquito hacia la izquierda (líneas de trazos).



12. Definición de u(α). *A partir de un punto* X *en el que la tangente forma un ángulo α, se traza una perpendicular a* Y *de longitud 1. Se dibuja* YZ *en ángulo recto con* XY, *lo que alcanza al lado en* Z. *Entonces* u(α) = YZ.



13. Para trazar la evolvente (en rojo) *de la curva roja, imaginemos un hilo fino arrollado sobre ella. Al irse desenrollando, el extremo libre describe la evolvente.*

curvatura infinito; cuanto más cerrado sea un arco de curva, tanto menor su radio de curvatura. Entonces, el resultado precedente sobre polígonos aproximantes conduce, en el límite, al siguiente principio de solución exacta: para un sofá óptimo, y para cualquier ángulo α, la suma de los radios de curvatura en los puntos donde la pared exterior del α-pasillo es tangente al sofá debe ser igual a la correspondiente suma para la pared interior.

Tenemos aquí una importante condición necesaria que ha de satisfacer toda solución optimal. Por ejemplo, vemos ahora que el sofá de Hammersley [*véase la figura 4*] no puede ser optimal, porque no verifica la condición anterior.(Con tres contactos, sea por caso, habría de verificarse $1 + 1 = L/2$, o sea, $L = 4$, mientras que $L \leq 2$). Esta fue, en esencia, la forma en que Conway y sus colegas de Copenhague comprendieron que dicha solución podría mejorarse.

El paso siguiente consiste en averiguar de qué forma varía el número de puntos de contacto entre el sofá y las paredes cuando el ángulo α lo hace de 0° a 90°. Y aquí aparece una segunda laguna de la demostración: la situación descrita en la figura 9 puede no ser la única posible. No obstante, Gerver ha logrado descartar un grandísimo número de variantes, y no hay ninguna otra que parezca verosímil. Por consiguiente, supone que existen (*como en la figura 9*) dos ángulos, θ y φ, con $0° < \theta < \varphi < 45°$, en los cuales el número de puntos de contacto varía en la secuencia 2,4,3 cuando α varía de 0 a 45 grados; y que tal secuencia se invierte para α mayor que 45°. Aunque en la figura 9 estos ángulos son $\varphi \approx 2°$, $\theta \approx 39°$, al empezar la demostración no se les atribuyen valores concretos. Seguidamente, Gerver define tres variables, $r(\alpha)$, $s(\alpha)$ y $u(\alpha)$ que desempeñan un papel crucial en todo el análisis. Las dos primeras son el radio de curvatura de los contornos exterior e interior del sofá en los puntos para los cuales la tangente forma ángulo α. La tercera cantidad, $u(\alpha)$, solamente se define para aquellos ángulos en los cuales el número de puntos de contacto es mayor que 2, esto es, entre φ y 90-φ. Su descripción, más complicada, resulta mejor plasmada en una figura [*véase la figura 12*]. Merced al principio anterior sobre radios de curvatura, amén de otros enunciados más complicados de tipo similar, Gerver demuestra las ecuaciones del recuadro 1.

A continuación, Gerver resuelve exactamente estas ecuaciones recurriendo a una combinación de cálculo diferencial y geometría. El resultado es el perfil que vemos en la figura 7, cuya superficie, como ya se ha dicho, es aproximadamente 2,22195. Los dos ángulos θ y φ resultan ser:

$$\varphi = 2{,}2448°$$
$$\theta = 39{,}0356°$$

La solución presenta un eje de simetría, y está compuesta por 18 arcos separados: nueve por la parte exterior del sofá y otros nueve correspondientes por el interior. Los segmentos no rectilíneos pueden parecer circulares en la figura, pero casi ninguno de ellos lo es. No obstante, se trata de curvas bien conocidas de la geometría diferencial. Para explicar lo que son, necesitamos la noción de *evolvente* de una curva: véase la figura 13. Utilizando esta terminología y las notaciones de la figura 7:

AB es un segmento rectilíneo.
BC es un arco de circunferencia de radio 1/2.
CD es un arco de una evolvente de una circunferencia.
DE es un arco de una evolvente de una circunferencia.
EF es un arco de la evolvente de la evolvente de una circunferencia.
FG es un segmento rectilíneo.
GH es un arco de una circunferencia de radio 1/2.
HI es un arco de una evolvente de una circunferencia.
IJ es un arco de la evolvente de la evolvente de una circunferencia.
JK es un arco de la evolvente de una circunferencia.
KL-RA se definen por simetría.

Aunque la demostración de optimalidad de Gerver ofrece algunas lagunas, solamente afectan al planteamiento general. Una vez dado tal planteamiento (por ejemplo, el ángulo total que se ha girado y la secuencia de número de puntos de contacto), la solución es exacta y única. Proporciona, cuando menos, lo que

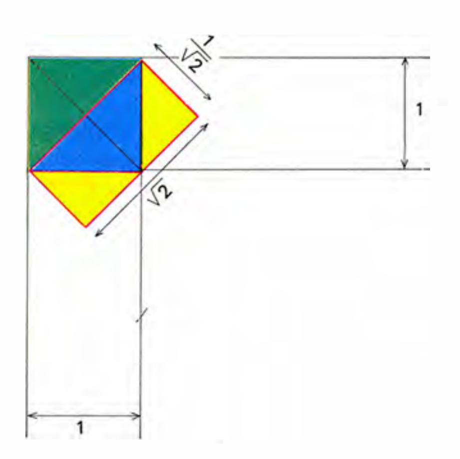
Recuadro 1. ECUACION DE GERVER:

Si $0 < \alpha < \varphi$ entonces $r(\alpha) = s(\alpha) = 1/2$.

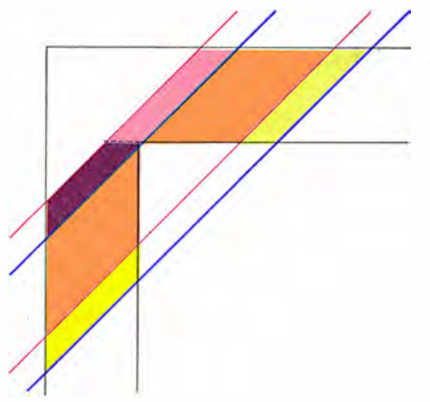
Si $\varphi < \alpha < \theta$ entonces $r(\alpha) = s(\alpha) + u(90° - \alpha)$.

Si $\theta < \alpha < 90° - \varphi$ entonces $r(\alpha) = u(90° - \alpha)$.

Si $\varphi < \alpha < 90° - \varphi$ y $\alpha \neq \theta$. $90° - \theta$ entonces $u'(\alpha) = -u(90° - \alpha) - s(\alpha)$ donde $u'(\alpha)$ es la variación de u en función de α (es decir, du/dα).



14. El rectángulo máximo capaz de doblar la esquina.



15. Demostración de que el área maximal no es mayor que $2\sqrt{2}$.

podríamos llamar "solución localmente optimal", esto es, la solución óptima correspondiente a su planteamiento. El sofá de Gerver es el de mayor superficie entre los propuestos hasta ahora. Y probablemente no se quede en eso. Existen razones de peso para pensar que no son posibles otros planteamientos; por tanto, es realmente muy verosímil que Gerver haya dado con el sofá óptimo.

"¡Buff!", resopló Archibald cuando su amigo Albert concluyó. "De haber sabido que iba a ser tan complicado me habría mordido la lengua y habría tenido la boquita bien cerrada." Tras agradecerle profusamente a Albert su información, Archie se apresuró a regresar a casa para dar a Maud la buena nueva de que su sofá podría ser 14 centésimas de un uno por ciento mayor de lo que había creído.

Pero cuando llegó a casa, Maud estaba de un humor de perros.

"¿Un sofá? ¿Un sofá... nuevo? Archibald, no alcanzo a imaginar como se te ha podido meter en la cabeza que necesitamos un sofá nuevo. ¡El viejo nos va perfectamente!"

"Pero, Maud, mi vida... ¡Tú querías comprar un sofá nuevo en Carcomueble! Me he pasado toda la semana..."

"¡Hummff!", resopló ella. "¡No me hables de Carcomueble! ¡Oye lo que te digo, Archie; sé de una tienda que ha perdido definitivamente a una clienta!"

"Pero... ¿por qué?"

"¡Se negaron en redondo a tapizarme el sofá de verde lima con lunares morados! ¡Dijeron que no tenían existencias del tejido... y que no pensaban tenerlas! El vendedor fue absolutamente *insolente* al decirlo. De verdad, no entiendo qué..."

Archie se arrastró sigilosamente hasta la tranquila comodidad de su sofá favorito, no optimal.

Soluciones:

1. El rectángulo máximo que se puede desplazar en torno a la esquina al tiempo que se le hace girar un ángulo recto tiene lados $\sqrt{2}$ y $\frac{1}{\sqrt{2}}$ [*véase la figura 14*]. Por tanto, su área es 1, lo mismo que el cuadrado unitario. (Una forma sencilla de ver que es así consiste en observar que los dos triángulos amarillos tienen las mismas áreas que los dos triángulos verdes; por tanto, el rectángulo azul y amarillo posee la misma área que el rectángulo azul y verde.)

2. La figura 3 muestra una franja de anchura unidad, girada un ángulo de 45°. Afirmo que la superficie naranja de esa figura es el área máxima de un sofá. Para verlo, imaginemos que el sofá está franqueando el codo, inclinado 45 grados. Es entonces inscriptible en alguna franja paralela a la mostrada en la figura 3 (y por encima de ella, pues de lo contrario el sofá sería una figura desconexa); digamos la franja comprendida entre las líneas rojas de la figura 15. ¡Y tiene también que encajar en el pasillo! Ahora bien, el área de la franja verde es igual a la de franja color de rosa, pero el área de la franja violeta es *menor* que la de la franja amarilla, a menos que las líneas marrones coincidan con las azules, cuando las áreas sean iguales (entre sí, e iguales a cero). Así, pues, la región coloreada entre las líneas rojas, en cuyo interior ha de alojarse el sofá, es menor o igual que la definida por las líneas azules, la cual es la región anaranjada de la figura 3, cuya área sabemos ya que es $2\sqrt{2}$.

3. El valor de L en la figura 4 que da el sofá máximo de esa forma particular que puede pasar alrededor del ángulo es $L=4/\pi$. El área exacta es

$$\pi/2 + 2/\pi$$

Libros

Hertz, inmunofarmacología, ciencia de los materiales, instituciones y biología marina

R. Pascual, F. G. Valdecasas, R. Miranda, L. Alonso y R. Margalef

Heinrich Hertz. Las ondas electromagnéticas, por Manuel García Doncel y Xavier Roqué. Publicacions de la Universitat Autònoma de Barcelona y Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya; Barcelona, 1990.

Reciente todavía la celebración del centenario del descubrimiento de las ondas electromagnéticas por Heinrich Hertz, resulta curioso pensar que, hace un siglo, nuestro espacio hoy tan repleto de ondas electromagnéticas de todo tipo, como demuestran los continuos conflictos de distribuciones de frecuencias para comunicaciones, no contenía más ondas electromagnéticas que las de origen natural. En cien años hemos pasado, de la detección por Hertz de unas ondas predichas por Maxwell, a una utilización masiva de las mismas, en un desarrollo tecnológico sin precedentes.

Ondas como las que Hertz generaba y detectaba en la vacía aula de física, de 15 metros de largo por 14 de ancho y seis de alto, de la Universidad de Karlsruhe, aprovechando las vacaciones de Semana Santa de 1888, hoy día se generan y se reciben en todas partes y para todo: nuestras radios y televisiones, nuestra radioastronomía, nuestras telecomunicaciones, etc.

El texto que comentamos va dirigido a públicos muy dispares, que aprovecharán partes muy diversas de la obra. Unos, estudiosos de la historia de la ciencia, sacarán probablemente el máximo provecho. Otros, enseñantes de física, aprenderán cuál era el ambiente científico hace cien años y cómo se realizaban grandes descubrimientos científicos. E incluso otros aprenderán multitud de cosas curiosas y cómo era, y en algunos aspectos sigue siendo, el ambiente de la ciencia básica, aparentemente inútil, pero que en cien años puede ofrecer aplicaciones espectaculares.

Las *Untersuchungen* son las reediciones de algunos trabajos, excepto uno, todos del propio Hertz, que éste preparó en 1891, siendo ya profesor de la Universidad de Bonn, a instancias del editor de los *Annalen der Physik und Chemie*, para poder atender a la gran demanda existente de separatas de los trabajos originales. La edición de Hertz de los textos en forma inalterada va acompañada de una interesante sinopsis que, con la perspectiva de unos años, ayuda a comprender la evolución de las ideas de su autor.

El libro consta de dos volúmenes en una carpeta. Uno de ellos contiene una traducción, acompañada de abundantes notas de tipo didáctico, histórico y textual (que ayudarán a los diversos tipos de lectores), de una selección de las *Untersuchungen* de Hertz, precedida de una introducción que explica y justifica la selección de los textos, enmarcándolos en su contexto histórico, y un conjunto de cinco apéndices que abarcan la teoría electrodinámica de Helmholtz, documentos relacionados con el descubrimiento de las ondas electromagnéticas, un estudio teórico del oscilador de Hertz y, finalmente, una descripción de los orígenes de la telegrafía sin hilos. El otro volumen es una reproducción facsímil de la obra original de Hertz.

Quizá lo más original del libro sea su apéndice tercero, en que se presenta la "conversión" de Hertz de su concepción electrodinámica, de acción a distancia entre emisor y receptor, a la concepción de teoría de campos y "ondas hertzianas". Para esta presentación se recogen fuentes no impresas correspondientes al período 1887-1888, tales como el diario, y la correspondencia y sus cuadernos de laboratorio.

El volumen que comentamos es el segundo de la colección "Clásicos de las Ciencias". El primero fue "Galileo Galilei. La Nueva Ciencia del Movimiento" y se anuncian los números 3 y 4. El tercero, en prensa, es sobre Leonhard Euler y el cuarto, en preparación, sobre Arquímedes. Esperemos que pronto sean una realidad y que sigan nuevos volúmenes en este esfuerzo conjunto de dos universidades catalanas. (R. P.)

Inmuno-Pharmacology. Principles and Perspectives, por Jürgen Drews. Springer-Verlag; Berlín, 1990.

En los comienzos del que todavía llamamos nuestro siglo, justamente en 1901, se otorgaron los primeros premios Nobel. El correspondiente a fisiología y medicina se concedió aquel año a Emil von Behring por "su trabajo sobre sueroterapia, especialmente por sus aplicaciones contra la difteria, con el cual ha abierto un nuevo camino en el dominio de la ciencia médica y poniendo con ello en manos del médico un arma victoriosa contra la enfermedad y la muerte", según se lee en la exposición oficial.

Aquel "nuevo camino", como con visión profética lo calificó el comité Nobel, de forma un tanto grandilocuente, según comenta irónico el propio secretario del mismo, Coran Liljestrand, ha conducido a la ciencia médica al campo que es hoy, sin duda, el más fértil para la investigación científica y el más prometedor "como arma victoriosa contra la enfermedad y la muerte": la inmunología. Aquellas "antitoxinas" misteriosas intuidas por Behring como sustancias producidas por el cuerpo animal para neutralizar a las toxinas bacterianas que Lòffler, descubridor del bacilo diftérico, había supuesto y que Roux y Yersin habían confirmado, dieron lugar, casi en el acto, a unas aplicaciones terapéuticas sensacionales, haciendo desaparecer en gran medida la enorme peligrosidad de la enfermedad diftérica, el célebre "garrotillo" (trágico diminutivo) que diezmaba la población infantil, lo mismo que la no menos enorme peligrosidad del tétanos –aunque éste fuera mucho menos frecuente– hasta llegar hoy a la utilización terapéutica de los propios anticuerpos puros en diversas aplicaciones clínicas, constituyendo un cuerpo de doctrina del más esperanzador porvenir.

Pues bien, el libro que ahora vamos a comentar abarca el estado actual de aquella incipiente ciencia, cuyo primer jalón hubo de merecer el primer premio Nobel no hace aún cien años. Aquella "arma victoriosa contra la enfermedad y la muerte" ha adquirido un increíble desarrollo. No sólo se han perfeccionado los primeros éxitos, sino que se han extendido a otros campos totalmente distintos y a solucionar problemas completamente nuevos enfrentados por la medicina en distintas áreas. La inmunología es hoy día una ciencia de por sí enor-

memente amplia. Abarca todos los mecanismos que mantienen en equilibrio la sociedad celular que constituye un "organismo", garantiza su identidad y le defiende de ser pasto de los depredadores microbianos, teniendo además el cometido de regenerar las partes orgánicas que hayan sufrido daño. El conocimiento de todos estos intrincados mecanismos involucrados en el proceso inmunitario es fundamental para muchos problemas médicos.

Realmente se necesitaba un texto orientado a la exposición de tantos avances terapéuticos logrados partiendo de la inmunología y muchos de los cuales ya están en la práctica clínica. El libro del profesor Drews es el primero que yo conozco que trata en conjunto sobre este tema al que da, con bastante propiedad, el nombre de inmunofarmacología. Porque aunque la palabra no sea absolutamente nueva, sí lo es en el contexto en que el autor la aplica o más bien con la amplitud con que la trata.

El desarrollo de los conocimientos médicos durante el presente siglo nos mostraban cada vez con más claridad que la acción terapéutica de los fármacos se producía a través de mecanismos naturales. El maestro de la farmacología española, Teófilo Hernando, en la conferencia inaugural del XI Congrès Internationale de Therapeutique (Barcelona 1971) ya nos decía que "la medicina futura tenía que aprender de la naturaleza y recurrir a los remedios que ella misma viene empleando desde siempre; una terapéutica que podría llamarse de reemplazo o restauradora; una verdadera autofarmacología que utilizara autofármacos y no los xenofármacos hasta ahora dominantes". Pues bien, los "autofármacos" ya los estamos manejando, unas veces indirectamente con xenofármacos que actúan sobre ellos o directamente en otras ocasiones como en el caso de los anticuerpos monoclonales.

Tratar por primera vez un tema tan extenso y tan reciente plantea dificultades. El profesor Drews hace una exposición didáctica, ilustrada con numerosos esquemas y tablas, que hacen comprensible tan proteica materia y abarca todas las posibilidades admisibles bajo el concepto de inmunofarmacología. Comienza, en realidad, por la exposición de los conocimientos actuales sobre inmunología en general, ya que el capítulo primero, titulado "Definición e Historia", está apenas esbozado. Quizá la historia de la inmunología merecía una mayor extensión.

Pero como dice el propio Drews, el libro que comentamos debe leerse, "más que como un libro de texto, como la introducción a un área de conocimientos que ha crecido por fuera de ámbito de la inmunología y ahora está ya en la órbita de la farmacología y la terapéutica clínica". Es esta órbita la meta a la que se dirige el libro. Sin embargo, el conocimiento de las funciones y de la estructura del sistema inmunológico es fundamental para comprender todas las posibilidades farmacológicas. La exposición aun resumida del sistema inmune era por tanto fundamental. Esto lo ha resuelto el autor con admirable claridad y concisión. No era nada fácil, dada la multiplicidad de células y de factores humorales que intervienen.

La parte verdaderamente farmacológica comienza en el capítulo tercero. La exposición de los temas atiende tanto a los problemas científicos como a la praxis clínica. La utilización clínica de los anticuerpos, desde el inicio como sueros heterólogos, con sus éxitos e inconvenientes, así como el desarrollo posterior purificando las IgG, tanto heterólogas como humanas, hasta llegar a las posibilidades terapéuticas de los anticuerpos monoclonales en los que tantas esperanzas se ponen para la terapia del cáncer y del rechazo de trasplantes. Todo es tratado con suficiente detalle para que el lector pueda hacerse idea clara de la forma de obtención de estas nuevas substancias, todas ellas de naturaleza proteínica, y de los esfuerzos realizados para soslayar las dificultades que se presentan en el uso clínico. El lector percibe claramente que el tema está aún en rápida y esperanzadora evolución. Que ninguno de los brillantes resultados obtenidos hasta ahora –por ejemplo, la tolerancia a los injertos– son ya del todo satisfactorios.

Los siguientes capítulos tratan de inmunosupresión, inmunoestimulación y acciones antialérgicas. Tres capítulos de gran actualidad y en cierta manera opuestos, pues los problemas médicos que hoy hay que resolver unas veces requieren la inhibición de una inmunidad "normal" para que los trasplantes se toleren; otras, estimular la inmunidad por estar deprimido el sistema, como en las inmunodeficiencias congénitas o adquiridas (SIDA); por fin, "otras", modularla, regularla o corregirla en los directos problemas inmunitarios: las reacciones hiperactivas y las graves enfermedades por autoagresión. Pero no se piense que el problema es fácil. En un campo tan complicado como el de las funciones inmunitarias se encuentran sorpresas a cada paso.

Muchas dificultades ha tenido que vencer el autor para hacer una exposición ordenada de un tema tan complejo y todavía en pleno desarrollo. Indudablemente ha sabido salir victorioso de la empresa. El libro es recomendable y debiera ser leído no sólo por el estudiante de medicina, sino también por todo médico con más de diez años de ejercicio profesional, ya sea internista, ya tenga alguna especialidad, pues no hay ninguna –desde la dermatología hasta la cirugía– en la que los procesos inmunitarios no tengan trascendencia. (F. G. V.)

MICROELECTRONIC MATERIALS, por C. M. R. Grovenor. Ed. Adam Hilger; Oxford, 1989.

Durante siglos, los científicos y los tecnólogos no han hablado el mismo lenguaje y los avances en nuestra capacidad de utilizar y modificar las propiedades de los materiales han tenido únicamente una base empírica. Un avance extraordinario de los últimos años es la interrelación estrecha que se ha desarrollado entre la ciencia básica –en especial, la física y la química– y la tecnología. Los descubrimientos de física básica se han convertido rápidamente en desarrollos tecnológicos, los cuales, a su vez, han deparado nuevos descubrimientos básicos. Esto se ha plasmado en el pujante surgir de la moderna ciencia de materiales.

La ciencia e ingeniería de materiales es actualmente un área interdisciplinaria que se ocupa de las relaciones entre estructura, propiedades y comportamiento de los materiales, armada con refinadas técnicas de análisis y potentes métodos de cálculo.

Dentro de la ciencia de materiales hay un terreno que es un ejemplo arquetípico de la fecundación mutua entre física básica y tecnología: la microelectrónica. A pesar de ello, en este campo los profesionales de la física básica, de la física aplicada y los de la tecnología no emplean todavía el mismo lenguaje en el grado deseable. Es por ello por lo que un texto como *Microelectronic Materials*, que representa un paso adelante en esta dirección, debe recibir la bienvenida de todos los relacionados con el fascinante mundo de la microelectrónica.

Este libro está destinado a explicar los criterios empleados en la elección de los materiales que se usan en la industria microelectrónica para fabricar la actual generación de dispositivos semiconductores. Los problemas de estabilidad de estos materiales se han hecho mucho más duros al reducirse

el tamaño de los dispositivos. No sólo esto, sino que la continua reducción de tamaño implica un papel cada vez más importante de las superficies e interfases en el comportamiento global del dispositivo. El reconocimiento del papel crucial de las superficies en las propiedades de los dispositivos –ya presente en los trabajos de los descubridores del transistor– ha sido determinante para el espectacular crecimiento de la física de superficies en todo el mundo. Asimismo, ha surgido un enorme interés por comprender los factores que determinan las propiedades eléctricas y mecánicas de los materiales en forma de películas delgadas, las condiciones para el crecimiento epitaxial y la caracterización de los defectos de los materiales.

Grovenor introduce en este libro una aproximación simple que intenta explicar la estructura, propiedades (sobre todo mecánicas y eléctricas) y procesamiento de los materiales usados en microelectrónica. Estos incluyen, no sólo semiconductores, sino también películas metálicas y capas aislantes que han sido, a menudo, considerados meros componentes "inactivos" de los dispositivos electrónicos. Un propósito central del libro es demostrar que sólo se pueden preparar dispositivos de elevadas prestaciones si se atiende a las propiedades e interacciones de *todos* los materiales. El libro ilustra, además, cómo se pueden diseñar y producir nuevos materiales que se ajusten a los requerimientos futuros.

Los dos primeros capítulos cubren material introductorio sobre propiedades básicas de semiconductores, contactos metal-semiconductor, estructuras de dispositivos y circuitos integrados, así como un extenso resumen de los procesos de fabricación de los dispositivos microelectrónicos. Los dos capítulos siguientes describen los métodos disponibles para desarrollar ("crecer") muestras monocristalinas de materiales semiconductores y películas delgadas policristalinas de materiales conductores. Luego se abordan los aspectos metalúrgicos de los esquemas de metalización basados en aluminio y oro. Las técnicas empleadas para depositar películas aislantes tanto en Si como en GaAs y sus propiedades se describen en el capítulo 6. El capítulo siguiente se dedica a los modos de empaquetar dispositivos de semiconductores, incluyendo las tecnologías de soldado e interconexión. Este apartado es novedoso. En el pasado esta parte se había considerado como de "baja tecnología". Sin embargo, su importancia se ha establecido ya. Una parte considerable de toda la ciencia de materiales necesaria para manufacturar componentes microelectrónicos es la empleada en el empaquetado, soldado e interconexión de los dispositivos. Se trata de un área muy poco conocida fuera del circuito de las industrias que los producen, por lo que su inclusión aquí resulta apropiada.

Los capítulos 8 y 9 se ocupan de los distintos materiales, fundamentalmente semiconductores compuestos, empleados para fabricar dispositivos optoelectrónicos (láseres, LED y fotodetectores) y células solares, respectivamente. El libro concluye con una descripción de los métodos de análisis de "fallos" en circuitos integrados, incluidas las técnicas de análisis microestructurales (microscopía electrónica de varios tipos) y microquímicas (espectroscopía de electrones Auger).

Este libro requiere un lector con un conocimiento mínimo de física de estado sólido y supone que éste tiene una comprensión de la ciencia de materiales suficiente para entender un diagrama de fase. Está escrito de una manera amena, se lee con facilidad y las ilustraciones son de razonable calidad. El enfoque del libro es fenomenológico y contiene una enorme cantidad de información. El tratamiento matemático es muy reducido y el énfasis recae en la descripción razonada de la fenomenología. Mantiene un equilibrio muy difícil de alcanzar entre los aspectos básicos de la física de superficies e interfases y las aplicaciones tecnológicas. Las referencias son apropiadas y el índice de materias está bien confeccionado.

En definitiva, *Microelectronic Materials* es un libro de gran interés para estudiantes de los últimos cursos de licenciatura y jóvenes licenciados en física, ingeniería electrónica y ciencia de materiales, en general. Aún más, es probablemente imprescindible para investigadores y profesionales de la microelectrónica, tanto en la universidad como en las empresas. (R. Miranda.)

SCIENCE IN SWEDEN. THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES 1739-1989, dirigido por Tore Frängsmyr. Canton; Science History Publications, 1989. **THE AMERICAN DEVELOPMENT OF BIOLOGY**, dirigido por R. Rainger, K. R. Benson y J. Maienschein. Philadelphia; University of Pennsylvania Press, 1988.

Dos libros conmemorativos: el primero, de los 250 años de la creación de la Real Academia Sueca de Ciencias y, el segundo, del centenario de la Sociedad Americana de Zoología. Dos libros sobre sendas instituciones y las personas que les dieron vida. Instituciones que han intervenido de manera sobresaliente en la promoción de la ciencia; personas cuya luz alumbra todavía muchas parcelas del saber.

Si dejamos de lado los precedentes italianos –Lincei o Cimento–, las grandes academias o sociedades científicas nacidas al amparo de la corona arrancan de la segunda mitad del siglo XVII. Se establece así, en 1660, la Regia Sociedad Londinense; seis años después, la Academia Real de Ciencias de París; en 1700, la Real Academia Prusiana de las Ciencias. Avanzado el siglo XVIII, en 1725, la Academia Imperial de San Petersburgo. El 2 de junio de 1739, Carl Linneo, Marten Triewald, Jonas Alstrom, Anders Johan von Hopken, Carl Wilhelm Cederkjelm *in absentia* y Sten Carl Bielken se comprometían en el Palacio de la Nobleza de Estocolmo a impulsar, por vía institucional, las ciencias aplicadas, la minería (Suecia era entonces el país más rico en hierro), la pesca, la silvicultura y la agricultura, es decir, el desarrollo económico de su pueblo a través de la ilustración de éste. Lo que implicaba recurrir a su lenguaje, dejando el saber estereotipado y el latín que lo vehiculaba para la universidad.

Desde su parto, la academia sueca se autofinanció con la aportación más o menos continua de donaciones, la más famosa de las mismas sería, andando el tiempo, la ligada al premio Nobel. Esa independencia económica apuntalaba su libertad de actuación, que persiste hasta nuestros días y que ha posibilitado el alto nivel científico de los institutos que dependen de la Academia. (La historia de esa y otras sociedades análogas enseña cómo los institutos de investigación constituyeron verdaderas avanzadillas de la ciencia; los alemanes, en particular, marcaron el camino en el primer tercio de nuestro siglo.)

Varios son los factores a considerar en el desenvolvimiento de la academia sueca. En primer lugar, su quehacer rutinario (reuniones regulares, conferencias y publicación en sueco de las actas). En segundo lugar, las relaciones con el exterior. A imagen de la londinense, las sociedades urgían a sus miembros mantener una correspondencia frecuente con los científicos extranjeros de su propia especialidad y proponer, de entre ellos, aquellos que dieran prestigio a la institución. La sueca fue mucho más allá e inventó, por así decir, el canje bibliográfico entre sociedades. Gracias a ello, y a los legados, dispuso desde sus primeros decenios de una biblioteca envidiable. En tercer lugar, su labor de patronazgo de la in-

vestigación en distintos frentes, desde el astronómico con la erección de nuevos observatorios hasta el naturalista con las expediciones; más aún, en una tarea en la que solía mezclarse el interés de la ciencia con el mercantil y militar, los suecos optaron por desnudarla de todo afán ajeno al puro saber. En cuarto lugar, la publicación del *Almanaque*, auténtico marcador de la vida diaria del país. Cuando Suecia decidió acomodar su calendario juliano al gregoriano, en 1753, no hubo que temer conmoción alguna, por cuanto todo, desde las medidas higiénicas hasta la siembra, se guiaba por su dictado; piénsese que esa publicación alcanzaría en pocos años la friolera de 300.000 ejemplares.

El temple de la Academia se mide en el pulso de sus secretarios. La primera época de esplendor coincide con el desempeño de Pehr Wargentin (1717-1783), famoso astrónomo que estudió las ocultaciones de los satélites de Júpiter. Alentó la apertura internacional de la sociedad, afianzó la investigación e introdujo nuevos cultivos (la patata) e innovaciones en las técnicas agrarias (reforma del arado). La segunda época dorada va asociada al nombre de Jacob Berzelius (1779-1848), quien fue secretario permanente desde noviembre de 1818. Habiéndose ganado un puesto central en la historia de la química (la traducción de sus informes anuales constituyeron el verdadero revulsivo de la nueva química en Europa), su pueblo le debe también la reestructuración de la enseñanza y, la Academia, su profunda renovación.

Muchas son las razones –los hechos– por las que puede vanagloriarse la academia sueca. El Museo de Historia Natural, por ejemplo, supo combinar la investigación de gabinete con la docencia y el recreo público. A ella correspondió impulsar las expediciones polares. Fue pionera en la protección ambiental con la gestión adecuada de sus bosques. Del *Almanaque* de ayer al *Ambio* de hoy, que edita de unos años a esta parte, media el esfuerzo de una de las sociedades estatales no gubernamentales que mayor beneficio ha reportado a la humanidad.

Pasemos de la vieja Europa a la nueva América. Sin tradición universitaria propia, como típica colonia inglesa, la ciencia en los Estados Unidos nace de abajo arriba. Es la comunidad la que se preocupa por educar a sus hijos y crea escuelas de agricultura, de minas y de artes y oficios. Ella es la que establece, por todas partes, desde mediados de siglo y, sobre todo, desde la guerra civil, gabinetes zoológicos, botánicos, paleon-

tológicos y de recursos minerales que sirvan para la enseñanza y el disfrute. Del seno de la comunidad surge también la figura que caracteriza a ese país: el filántropo, llámese Vassar, Cornell o Rockfeller, por citar sólo algunos de los que han perpetuado su apellido en universidades.

Ese empuje ascendente se contrapone a la instauración por la corona o auspiciada por ella. Lo que de ésta dimana es, forzosamente, centralizador, con rígidos estatutos. Las sociedades norteamericanas que brotan espontáneas responden al deseo compartido de aunar esfuerzos sin mayores lazos con las que, por el mismo sistema, aparecen en el condado lindante. El riesgo obvio es el de la atomización, que sólo se salvará con la convergencia y el ejemplo de las más eficaces (la de químicos).

Tales condiciones externas abrigan una atmósfera de trabajo idónea para la innovación. Cualquiera podía asistir, en un comienzo, al laboratorio de biología marina de Woods Hole y realizar allí la investigación que él mismo se hubiera propuesto. Como es paradigmático, en otro orden pero dentro del mismo contexto, el modo de enseñar de Charles Otis Whitman, indiscutido mentor de la biología estadounidense: dejar que los alumnos, tras pocas clases magistrales, "se ahogaran si no aprendían a nadar"; no había más flotador que la bibliografía y la propia imaginación.

Hubo otro factor: la continuidad del trabajo y la integración en equipos. Si un centro contrataba a una figura de relumbrón debía cargar con todos sus colaboradores y ofrecer un laboratorio mejor equipado que el de partida. Lo demás, la ciencia, vino por añadidura: transformación del sistemático al viejo uso en microbiólogo, embriólogo, morfólogo, fisiólogo, genético...

Así, un país que en el siglo XIX enviaba sus mejores alumnos a Alemania, Italia (la estación de Nápoles fue le meca de la biología), Inglaterra o Japón incluso, se convirtió, al doblar el siglo, en la nación receptora por excelencia. De todo ello, y de bastante más, se ocupa este volumen, en el que, a pesar de la pluralidad de autores, no hay repeticiones ni capítulos estancos que puedan leerse por separado. Si acaso, para encontrar mayor nervio teórico, complétese con *Defining Biology. Lectures from the 1890s*, de Jane Maienschein, comentado ya por esta revista. (L. A.)

TOPICS IN MARINE BIOLOGY. Proceedings of the 22nd European Marine Biology Symposium (Faculty of Biology, University of Barcelona, Barcelona, Spain, August 1987). Dirigido por Joandomènec Ros. *Scientia Marina*, 53 (2-3), del Instituto de Ciencias del Mar, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Barcelona.

A partir de 1966 los simposios europeos de biología marina (EMBS) se han convertido en un acontecimiento regular que reúne anualmente un grupo numeroso de biólogos marinos de Europa, y no raramente su atracción se extiende a biólogos de ultramar. Los organizan, por turno, diversos centros de investigación marina europeos, que van siendo recorridos de manera sucesiva, en el desarrollo de este experimento en comunicación científica. En 1987 le tocó el turno a Barcelona y la responsabilidad de la organización recayó sobre el departamento de ecología de su universidad. La reunión se hizo en agosto, en época de vacaciones, también para aprovechar las oportunidades ofrecidas por las residencias universitarias. La resaca del simposio fue preparar para su edición los 78 trabajos que se recogen en este volumen, todos ellos sometidos a evaluación, los más a revisión y luego a publicación cuidadosa. El máximo responsable y los que han colaborado con él se han desembarazado de su labor con un éxito y una elegancia poco comunes en las empresas del mismo género que en nuestro país se han intentado. Ahora tenemos reunidos en un volumen muy bien editado casi todos los trabajos presentados en las sesiones.

Para cada uno de los simposios EMBS se seleccionaron entre uno y cuatro temas principales, propuestos como centros de atracción o de condensación de las ideas. Hay que decir que su interpretación, a la hora de aceptar los trabajos, nunca puede ser muy rigurosa dada la interconexión de los temas en la ciencia del mar. Es claro que siempre primó la calidad intrínseca de las contribuciones sobre el grado de aproximación con que cada uno se podía asociar a la definición, más o menos arbitraria, de un tema de estudio. En el simposio de Barcelona, los temas sugeridos fueron cuatro: 1) Estuarios, deltas y lagunas costeras (atrajeron 28 comunicaciones), 2) Sistemas frontales persistentes (17 comunicaciones), 3) Comunidades bentónicas (21 comunicaciones), a las que se añadió, como comodín, una sección 4) sobre fisiología y polución, con 12 comunicaciones. Aproximadamente la quinta parte de las contribuciones son de autoría española. La edición de todos los trabajos se ha hecho en inglés, lo que es

habitual desde el principio en esta serie de simposios. No hay presentaciones de carácter general, sino que todos los trabajos, o casi todos, tienen un grado considerable de especialización y aportan datos experimentales o de observación; es decir, son elementos de construcción de la biología marina.

En este comentario general no se puede hacer referencia precisa o distinguir algunos de los trabajos publicados, y los hay excelentes, sino ofrecer, simplemente, una impresión general. El tema de los frentes marinos no pierde actualidad. Cualquier discontinuidad o frontera en la masa de un fluido, que es generalmente asimétrica, tiene importancia ecológica en el mar porque suele ir acompañada de una intensificación brusca de la producción primaria; pero los mecanismos no son nunca simples ni su estudio es fácil. Este tema es apropiado para analizar y modelar muchas relaciones entre fitoplancton y zooplancton, o entre plancton y peces, de una manera que sólo indirectamente se relaciona con el tema de los frentes. Los frentes asociados con las mareas, y también los sistemas divergentes más productivos del Mediterráneo siguen atrayendo interés. Con mejor o peor justificación se les unen otros temas de investigación planctónica, como es la respiración y alimentación del zooplancton. Cabe pensar que el estudio sinóptico de la distribución vertical de la respiración potencial (ETS), en combinación con la distribución vertical de la producción primaria potencial, podrá ayudar a integrar la función biológica de los océanos, y el transporte interno neto. Poco a poco, aunque todavía no del todo, se está saliendo de la rutina de los "ciclos anuales" y de la fe en obtener repeticiones plenamente comparables.

Los trabajos sobre comunidades bentónicas se centran alrededor de la vida de diferentes grupos de organismos, sobre estratificación y actividades fisiológicas en el sedimento, colonización, productividad, crecimiento, bentos de cuevas submarinas y ecología de algunos grupos, entre otros, de peces, opistobranquios, celentéreos y algas. Si hay algún tema fundamental que se repite es, probablemente, la estratificación y dinámica en los sedimentos blandos, en relación con los gradientes electroquímicos, que hacen que dichos sistemas sean comparables con cualquier otro ecosistema de mayor altura. A diferencia de las comunidades del plancton, móviles con el agua, la mayor persistencia en el tiempo de las relaciones de localización en el bentos se presta a examinar diversos aspectos de su estructuración.

Las lagunas costeras y zonas deltaicas han inspirado numerosos trabajos, algunos relativos a áreas exóticas, como Puerto Rico y Costa del Marfil, aunque en su mayoría se refieren a los mares europeos. La persistencia de las poblacions y estimas del balance de flujos son los temas más atendidos. Inevitablemente, en esta fase, la mayoría de los trabajos han de mantener un carácter descriptivo.

La última sección trata de la regulación y resistencia a los cambios de salinidad, así como también de la respuesta a los llamados contaminantes, como petróleo, metales o pesticidas, principalmente cuando actúan sobre organismos explotados o cultivados. La combinación de fisiología y aspectos prácticos resulta, sin duda, un tanto periférica a los temas de orientación más genuinamente ecológica.

En resumen, este volumen ofrece una imagen significativa de los temas que actualmente son más atractivos para los investigadores europeos que se ocupan de biología marina. Pero es claro que seguimos sin definir lo que es la biología marina. No se puede decir que sea simplemente la biología de los organismos que viven en el mar, sino que ciertas consideraciones de tipo ecológico entran generalmente en la delimitación, sin ser predominantes. El sentido de relativa unidad de una disciplina viene muchas veces de la percepción de sus cultivadores, y esto depende a veces del accidente de las relaciones personales; de esta forma nos damos cuenta del carácter fronterizo de la mayoría de las ciencias del mar, y este carácter de interacción entre disciplinas tradicionales es muy positivo. La serie de simposios de biología marina atestigua todas estas interacciones y el volumen que comentamos, cuando se recorre con cierta atención, permite identificar numerosas áreas y problemas que justificarían un esfuerzo más prolongado en el futuro.

El volumen forma parte de la revista "Scientia Marina" y se distribuye a los suscriptores de *dicha revista*, o a las entidades que tienen establecido intercambio con ella. Se ha hecho, además, una tirada extra, especialmente encuadernada –y con una elegante sobrecubierta que ilustra el polícromo bentos mediterráneo sobre fondo rocoso– que se puede adquirir por separado y directamente del departamento de ecología de la Universidad de Barcelona. (R. Margalef.)

Apuntes

Gracias al avance de la geoquímica se ha progresado bastante, a lo largo de los últimos 30 años, en el conocimiento del origen y la evolución de la corteza continental. Pero no lo suficiente para crear un cuerpo de doctrina homogéneo sobre esa capa de unos 40 kilómetros de espesor que ocupa hoy unos dos quintos de la superficie de la Tierra. Hay dos teorías dominantes: la que atribuye a la corteza un origen temprano en la historia del planeta y la que afirma que se ha ido formando gradualmente en el curso del tiempo geológico. La suerte parece decantarse en favor de la segunda con el descubrimiento del aumento progresivo de la concentración de zirconio en su seno.

A tenor de la hipótesis vigente, la Tierra se formó por acreción de restos meteoríticos primitivos enteros, del tipo de las condritas carbonáceas. ¿Cómo pudo, pues, convertirse en una estructura en capas, con núcleo, manto y corteza? Para resolver la cuestión se acaba de proponer un modelo de diferenciación que se funda en experimentos realizados con muestras fundidas del meteorito de Allende, en los que se estudian los procesos de enfriamiento y cristalización. El esquema de fases, en breve, sería el siguiente: se partiría de un núcleo fundido, se fraccionaría la magnesiowüstita, se enfriaría el manto de silicatos y se solidificaría a continuación, procesos que se explicarían por los equilibrios de fases y relaciones de densidad entre los distintos componentes implicados (silicatos, FeO, MgO, Fe-Ni-S, magnesiowüstitas, perovskitas y otros).

El tesón no es añeja virtud de la época heroica de la ciencia, ni regla y consejo cajaliano. La constancia y la vieja técnica de las placas fotográficas han conseguido correr el velo que celaba la naturaleza de un objeto estelar, descubierto hace ya 50 años, muy poco conocido: MWC560. Carentes del poderoso arsenal de detectores electrónicos de estado sólido, hoy habituales en la mayoría de los telescopios, con sólo las armas mencionadas, un grupo de astrónomos búlgaros han aportado documentación suficiente para afirmar que se trata de un sistema binario formado por una gigante roja y una compañera compacta —quizás una enana blanca—, que eyecta materia en chorro a lo largo de la línea de visión.

La hipótesis de la gran explosión (''Big Bang'') para explicar el origen y la expansión del universo se asienta en los siguientes pilares teóricos: el corrimiento hacia el rojo de la luz interestelar (cuanto mayor es, más alejada se halla su fuente y más veloz se mueve), la uniformidad de la radiación de fondo de microondas y la homogeneidad del cosmos a distintas escalas de longitud. Se trata de una teoría sometida hoy a duros embates. Aunque sus objetores no ofrecen todavía un modelo alternativo convincente, niegan esos fundamentos con contraejemplos observacionales. Por citar aquí uno, hay cuásares muy desplazados hacia el rojo que parecen asociados con galaxias de escaso corrimiento.

Sabido es que la teoría del origen de la vida se debate en una suerte de aporía del tipo de quién fue antes, si el huevo o la gallina. Es decir, si los ácidos nucleicos, necesarios para determinar la síntesis de enzimas y otras proteínas, o si las enzimas, responsables de la polimerización y replicación de los ácidos nucleicos. El descubrimiento del ARN con función catalítica no logró aclarar el mecanismo de la síntesis proteica inicial. Así las cosas, una nueva hipótesis ha saltado a la arena: en el principio bien podría haber una molécula ''híbrida'' de ácido nucleico y proteína, una suerte de éster triacídico de aminoadenosina, substancia recién creada en el Instituto de Tecnología de Massachusetts.

Aunque se desconoce el autor de la clasificación (el lector entenderá el motivo), la columna vertebral cumpliría una triple misión: ser soporte de la cabeza, ser soporte de las extremidades y soportar las agresiones de quiroterapeutas y quiromasajistas. El rictus de desprecio de médicos y cirujanos por la labor de los que dicen curar con las manos podría helarse si prospera la petición del Consejo Británico de Investigación Médica de incluir a esos prácticos en los servicios de la seguridad social.

Como saben desde tiempo inmemorial los agricultores y era capítulo obligado de todos los libros sobre el campo, desde Catón y Columela hasta las famosas ''cartillas'' decimonónicas, la riqueza en nutrientes de un medio condiciona el vigor de la planta y el esplendor de la cosecha. Se ha corroborado ahora ese influjo incluso en la capacidad fecundadora del polen. En igualdad de oportunidades, se producen más semillas cuando los estigmas del rábano silvestre se polinizan con el polvillo de planta bien alimentada.